

(19) 流入負荷量を考慮した琵琶湖水質分布の予測手法に関する基礎的研究

Study on Water Quality Distribution in Lake Biwa in Consideration of Runoff Pollutant Loads into the Lake

市木敦之* 佐々木暁人** 坂田典久*** 仲倉香菜子*** 山手博之***

Atsushi ICHIKI, Akito SASAKI, Norihisa SAKATA, Kanako NAKAKURA and Hiroyuki YAMATE

ABSTRACT; Many strategies for water quality conservation in Lake Biwa are being carried out mainly by reducing runoff pollutant loads into the lake. But influence of the runoff load reduction on the water quality in Lake Biwa has not been clarified enough so far. This study is aimed at discussing methodology to estimate water quality distribution in Lake Biwa using runoff pollutant loads from its basin. The runoff loads from the basin are calculated by Macro Model with GIS database of the Lake Biwa basin, and the water quality distribution in the lake is estimated by spline technique with the calculated runoff loads. As a result, it has been proved that the methodology has enough reproducibility to estimate the water quality distribution in Lake Biwa and is also available to examine the water quality in the lake.

KEY WORDS; GIS, Lake Biwa, Macro Model, spline technique, water quality distribution

1. はじめに

琵琶湖における水質改善事業は流入負荷削減対策を中心に実施されているが、そうした流入負荷量の削減が琵琶湖の水質に及ぼす影響については充分明らかにされていない。琵琶湖集水域の流域情報については、近年 GIS データベース^{1),2)}化が進みつつあり、筆者らは、これに汚濁物流出モデルであるマクロモデル³⁾を組み込むことで汚濁物流出管理支援システムを開発してきた⁴⁾。これにより集水域の特性に応じて変化する琵琶湖への流入負荷量を予測することが可能となった⁵⁾。しかしながら、琵琶湖へ流入した汚濁物が湖内水質を形成する過程についての知見は必ずしも充分でないため、流域の社会変化にともなって琵琶湖水質がどのように変遷していくかを予測し、水質保全のための正しい流域管理のあり方を議論していく方策がないのが現状である。本論文は、まず琵琶湖における流域特性をもとに流入負荷量を推定し、ついでこの流入負荷量の推定値をもとに湖内の水質分布を推定する一連の予測手法を構築すること目的としており、その方法論について基礎的な検討を試みたものである。図1に本予測手法による処理フローを示す。流入負荷量の推定にはマクロモデルを、湖内水質分布の予測にはスプライン補間モデルを用いた。対象とする水質項目は TN と TP であり、計算の時間ステップは流入負荷量予測部については日単位、水質分布予測部では年間値とした。琵琶湖の水質評価については、永礼らが琵琶湖水質に関する3次元的な調査を継続して行い、湖内における栄養塩の存在量を求めている⁶⁾ものの、多く場合には、環境基準点における表層水質(水深0.5m)をもとに議論されている。そのため、ここでも琵琶湖の表層水質を予測の対象とした。

* 立命館大学理工学部環境システム工学科 (Dept. of Environmental Systems Engineering, Ritsumeikan Univ.)

** 高槻市 (Takatsuki City Office)

*** 立命館大学大学院理工学研究科 (Graduate School of Civil and Environmental Engineering, Ritsumeikan Univ.)

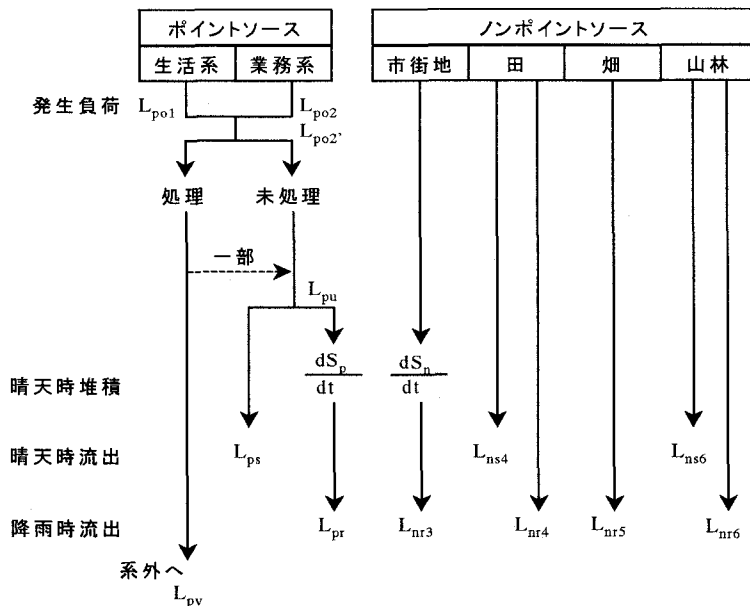
2.琵琶湖流入汚濁負荷量の推定

流入負荷量予測部では、琵琶湖集水域からの負荷量が流入河川別に算定される。マクロモデルは、汚濁物の流出挙動が発生源や晴雨により大きく異なることを考慮して構築されており、その構成およびパラメータの同定手順に関しては、すでに既報^{3),7)}で示されている。琵琶湖のように集水域における水田面積の占める比率が一定以上ある場合、晴天時にも流出をみる灌漑水に由来する農業系負荷を無視することはできないことから、ここでは、図2および(1)～(10)式に示されるように、灌漑期における田面水の晴天時流出成分 (L_{ns4}) を考慮にいたしたモデルと表1に示されるパラメータを用いることとした。これにより、灌漑期と非灌漑期において異なる水田由来の汚濁物流出特性について、より現象に即した記述が可能となる。

$$L_{pv} = (L_{po1} + L_{po2} + L_{po2'}) \cdot X / 100 \quad (1)$$

$$L_{pu} = (L_{po1} + L_{po2} + L_{po2'}) \cdot (1 - X / 100) \quad (2)$$

$$L_{ps} = L_{pu} \cdot (1 - y / 100) \quad (3)$$



L : 負荷量 (kg/day) S : 堆積量 (kg)

添字 p : ポイントソース (1:生活系, 2:業務系二次産業, 2':業務系三次産業)

n : ノンポイントソース (3:市街地, 4:田, 5:畑, 6:山林)

o : 発生 v : 処理 u : 未処理 s : 晴天時 r : 降雨時

図2 マクロモデルの概要

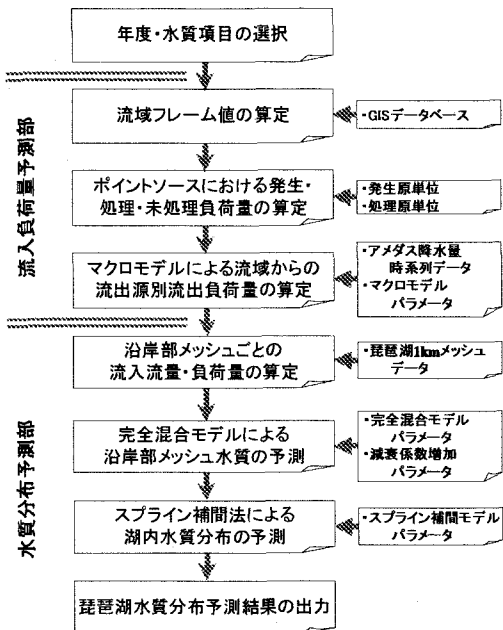


図1 流入負荷量－水質分布予測の処理フロー

$$dS_p/dt = L_{pu} \cdot y / 100 - L_{pr} \quad (4)$$

$$L_{pr} = k_p \cdot S_p^a \cdot Q_r^b \quad (5)$$

$$dS_n/dt = k_{n3} \cdot S_{n3} \cdot \exp(-k_{n3} \cdot T) \quad (6)$$

$$L_{n3} = S_n \cdot \{1 - \exp(-k_{n3} \cdot R)\} \quad (7)$$

L_{n3} ($i=4, 6$) は当該土地利用の単位面積あたり一定、ただし非灌漑期の $L_{n34}=0$ (8)

$$L_{nri} = k_{ni} \cdot Q_r^b \quad (i=4 \sim 6) \quad (9)$$

$$b = \alpha \cdot X + \beta \quad (10)$$

ここに、 X はポイント負荷の排除率 (%), y は晴天時におけるポイント負荷の堆積率 (%) である。

入力データは、流域特性を整理した GIS データベースとポイント負荷に関わる原単位およびアメダスの降水量時系列データである。用いた GIS データベースは、流域界や行政界、土地利用、下水の処理形態別区域界といった空間データに、人口や産業構造、下水処理形態別の人口などの属性データを組み合わせたものである。アメダスによる気象観測地点は、琵琶湖集水域に 13 地点あるため、

表 1 マクロモデルのパラメータ

項 目		TN	TP
晴天時 堆積	晴天時堆積率 y (%)	48.60	65.10
	住専系	0.014	0.003
	住商系	0.027	0.001
	工業系	0.064	0.027
	幹線道路	0.019	0.016
	屋根	0.007	0.001
	kn_3 (1/day)	0.095	0.121
	L_{n34}/A_4 (kg/km ² ・day)	2.713	0.175
	灌漑期	0.000	0.000
	非灌漑期	1.726	0.040
降雨時 流出	L_{n36}/A_6 (kg/km ² ・day)	1.726	0.040
	灌漑期	1.726	0.040
	非灌漑期	1.726	0.040
	kp ($\times 10^{-4}$ /km ²)	8.969	3.360
	kn^3 (d/mm)	0.048	0.067
	kn_4/A_4 ($\times 10^{-2}$ /km ²)	1.938	0.272
	kn_5/A_5 ($\times 10^{-2}$ /km ²)	6.308	6.142
降雨時 流出	kn_6/A_6 ($\times 10^{-2}$ /km ²)	0.915	0.131
	α ($\times 10^{-3}$)	2.386	3.998
	β	0.800	0.837

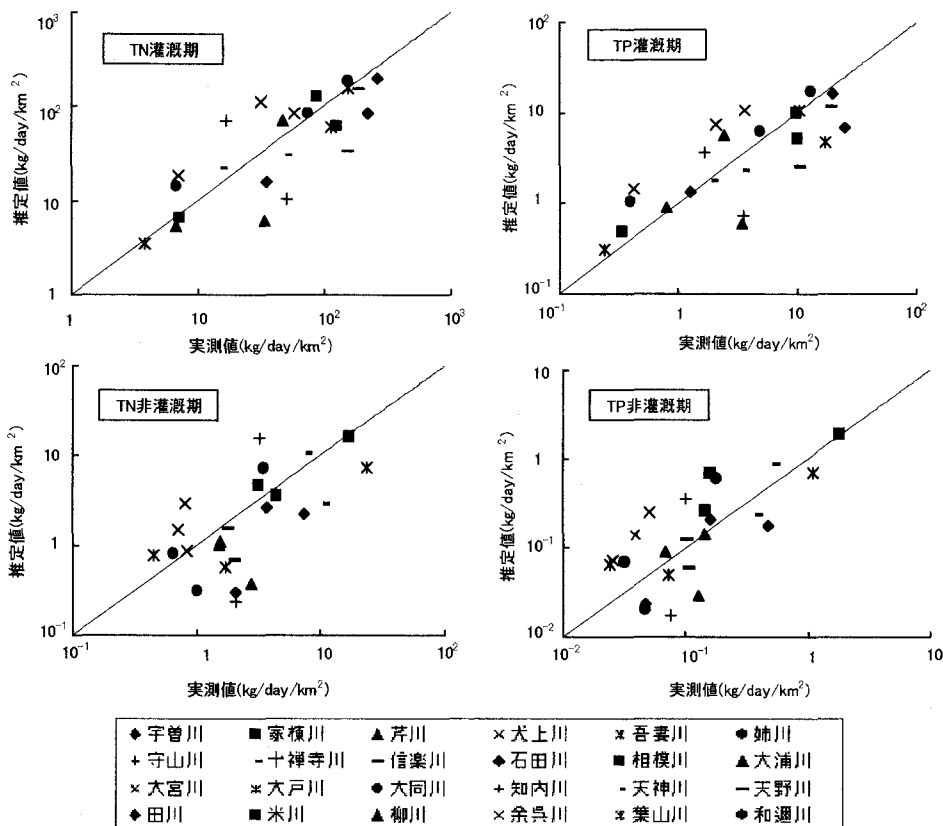


図 3 晴天時流入負荷量の推定値と実測値の関係
(上：灌漑期、下：非灌漑期)

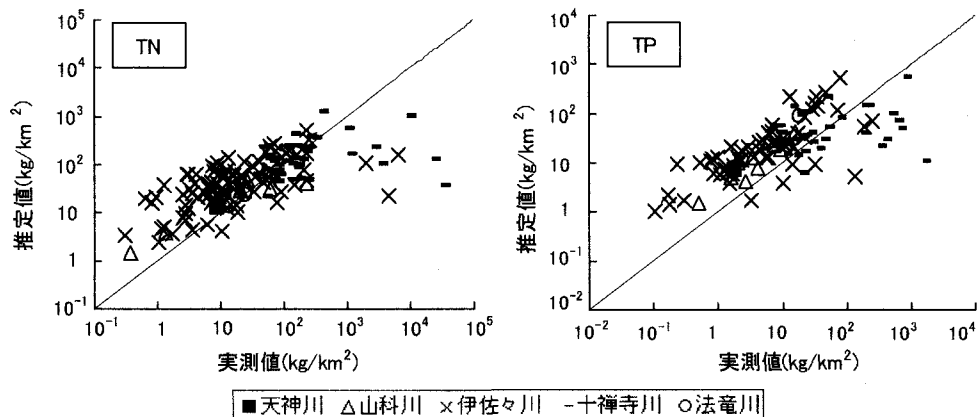


図4 降雨時流入負荷量の推定値と実測値の関係

あらかじめティーセン分割により定められた地域別に、それぞれ観測降水量データを日単位で与えた。これにより、流入河川別に日々の流入負荷量が算定される。1983年から1998年までの16カ年を対象として、流入負荷量の推定計算を行い、結果を晴天時・降雨時別に実測データと比較した。晴天時の実測データには、琵琶湖流入河川のうち環境基準点の置かれている24集水域において年12回の測定値を用いた。灌漑期(5～9月)と非灌漑期(10～4月)のそれぞれについて、晴天時流入負荷量の中央値をもって推定値と実測値の関係を示したものが図3である。実測値と推定値の相対誤差(=|推定値-実測値|/実測値×100(%))の平均値は、灌漑期でTN68.53%、TP75.73%、非灌漑期でTN76.84%、TP112.42%となり、灌漑期において比較的適合性が高い結果となっている。非灌漑期では、いくつかの河川において相対誤差が高い値を示しており、それらにつられて平均相対誤差が大きい値となったものである。降雨時の実測データには、琵琶湖流入河川である伊佐々川(92降雨)、十禅寺川(58降雨)、法竜川(9降雨)のほか、京都市内の天神川(2降雨)と山科川(21降雨)における測定値から特異値を検定棄却したデータを用いた。なお、天神川と山科川における推定計算には、京都地方気象台における観測降水量データを入力することとした。各調査降雨における推定値と実測値の関係を図4に示す。ここでは計算の時間ステップを日単位としているため、降雨による直接流出の時間が1日以内であるような小さな降雨の場合には推定値が過大に、逆に2日以上にわたる大きな降雨の場合には過小になる傾向がある。伊佐々川と山科川において推定値が過大評価となっているが、ほかの河川については推定値と実測値の誤差は1オーダー以内に収まっている。実測データ自体のばらつきがあることを斟酌すると、精緻な議論を行うにはまだ相当の課題があるが、本研究で意図する巨視的な傾向の検討にはおおむね充分な再現性のあるものとみなしてよい。

3. 琵琶湖水質分布の推定

3.1 スプライン補間モデルによる湖内水質分布の推定

琵琶湖内の水質分布状況を2次元的な分布パターンとして把握することは、湖内における水質の状況を全体的に把握、評価するための、有効な手法のひとつである。しかし、水質データは離散的なごく限られた地点についてのみ得られるのが通常で、滋賀県環境白書⁸⁾によると、琵琶湖においては47地点で湖内の水質データが得られている。したがって、2次元的な水質分布の推定には、適当な補間方法の選択とその適用技術の検討が重要な課題となる。藤原らは、スプライン補間法を用いて琵琶湖南湖の水質分布パターンを推定するための適用技術を検討し、各データ測定地点が水質分布パターンに及ぼす影響について評価している⁹⁾。スプライン法によるデータ補間法では、そのパラメータの設定の仕方により、測定点密度が小さくても比較

的滑らかな曲面を得ることができ、直感に合わないような極値が分布曲面上に現れることを抑制することができることから、本研究においてもこれを用いることとした。2次元の直交座標系水質データ $g_{x,y}$ (mg/L) におけるスプライン補間法の基礎式は(11)式で表される。

$$g_{x,y} = \{(8 + \delta \cdot h^2) \cdot (g_{x+1,y} + g_{x-1,y} + g_{x,y+1} + g_{x,y-1}) - 2(g_{x+1,y+1} + g_{x-1,y+1} + g_{x+1,y-1} + g_{x-1,y-1}) - (g_{x+2,y} + g_{x-2,y} + g_{x,y+2} + g_{x,y-2})\} / (20 + 4\delta \cdot h^2) \quad (11)$$

ここに、 δ はスプラインパラメータ、 h はメッシュ幅 (km) である。

本論文では、1km メッシュ ($h=1$) において、 $\delta=1.0$ として(11)式による繰り返し計算を行うものとした。繰り返し計算は、計算前後における推定値の差がいずれのメッシュにおいても TN で 0.001mg/L、TP で 0.00001mg/L を超えなくなるまで継続した。

滋賀県環境白書に記載されている水質調査地点 47 地点の中から任意に 25 地点を選定し、これに実測データを入力してスプライン補間法を用いることにより水質分布を推定し、残りの 22 地点における推定値と実測値を比較することによりスプライン補間法の算定精度の検証を行った (図5)。用いた実測データは、1984 年から 1998 年における年平均値である。検証地点における推定値と実測値の関係を図6に示す。両者の関係は、TN で相関係数 0.875、平均相対誤差 7.1%、TP で相関係数 0.864、平均相対誤差 18.8% となり、おおむね良好な推定精度がみとれる。

3.2 完全混合モデルによる沿岸部水質の推定

流入負荷量—水質分布予測の処理フロー (図1) における水質分布予測部では、図7に示されるように、琵琶湖面の 1km メッシュ分画データのうち、まず陸域からの負荷量の流

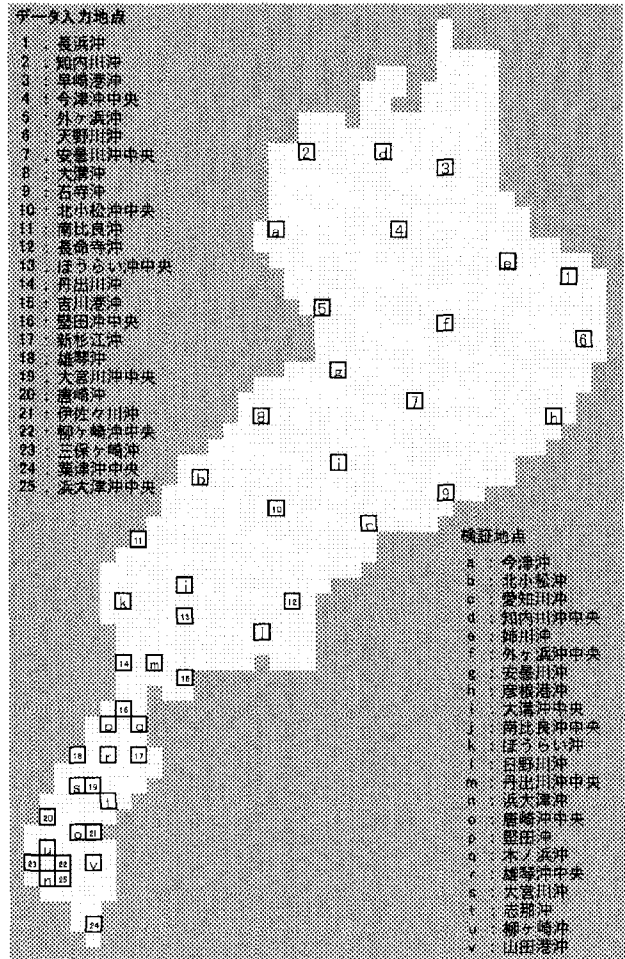


図5 スプライン補間法の算定精度検証地点

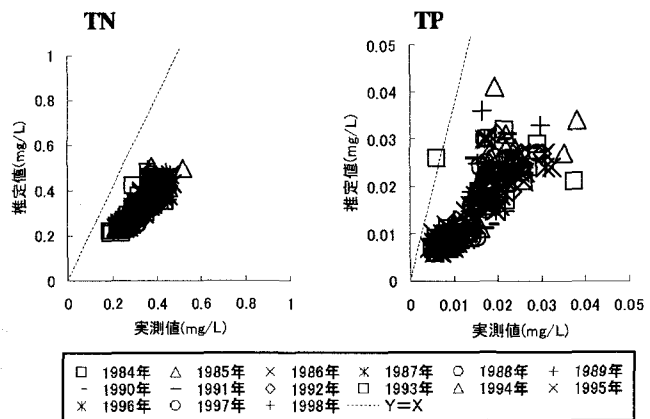


図6 琵琶湖実測水質データを用いたスプライン補間法による湖内水質の推定値と実測値の関係 (1984年～1998年)

入がある河口や流域に接するメッシュを琵琶湖沿岸部メッシュとして、各メッシュ内の水質が、河口の位置データと流入負荷量をもとに算定される。GIS の河口データが存在する流域については河口ポイントが含まれるメッシュに負荷量と流量が流入することとした。また、河口データが存在しない流域のうち流域界が一つのメッシュにしか接していないものについてはそのメッシュに流入があるものとした。流域界が複数メッシュにわたって接しているものについてはメッシュごとに流域が接している距離の割合で流入負荷量・流量の配分を行った。加えて、陸域からの流入分のほかに下水処理場の処理放流水についても同様に下水放流ポイントの位置するメッシュに放流されることとした。これにより、負荷量入力のある 233 メッシュを琵琶湖沿岸部メッシュとしている。各沿岸部メッシュの中は図 8 に示すような深さ 1m の完全混合ボックスモデルで表せるものと考え、(12)式により負荷量収支を計算するものとした。

$$C \cdot V = \{C_0 \cdot V + C_{in} \cdot Q_{in} - (C_0 \cdot V + C_{in} \cdot Q_{in}) / (V + Q_{in}) \times Q_{out}\} \cdot (1 - \sigma) \quad (12)$$

ここで、 σ は汚濁物の減衰係数 (1/day) であり、沈殿や底泥からの溶出による負荷量の増減を表す。松梨らは、閉鎖性海域における水深 Z (m) と水の更新率 f (1/day)、および表面負荷 L/A (ton/km²/day) を用いて Vollenweider 型の(13)式で表される負荷量曲線を描くことにより、海域の環境基準類型ごとの減衰係数を求めている¹⁰⁾。

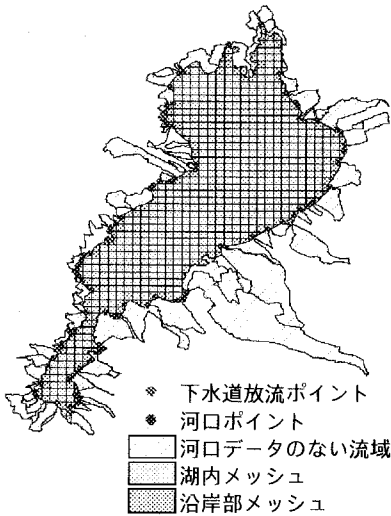
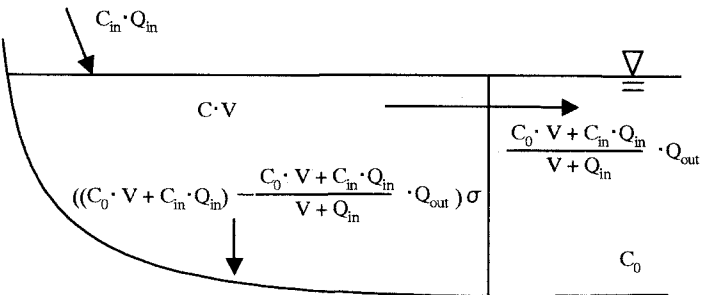


図 7 琵琶湖内のメッシュ分割



C : 沿岸メッシュ水質 (mg/L), V : 沿岸メッシュ容積 (m³),
 C_{in} : 流入水質 (mg/L), Q_{in} : 流入流量 (m³/day), C_0 : 湖内水質 (mg/L),
 Q_{out} : 下流メッシュへの移流流量 (m³/day), σ : 減衰係数 (1/day)

図 8 沿岸部メッシュ

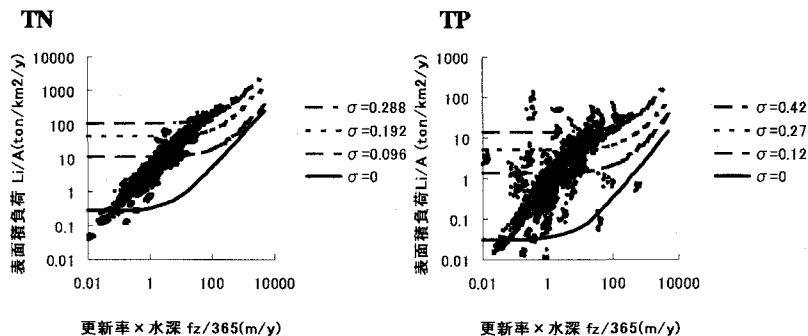


図 9 琵琶湖沿岸メッシュにおける負荷量曲線

$$L/A = (C - C_0) \cdot f \cdot z + C \cdot \sigma \cdot z + C_0 \cdot Q_{in} \cdot z / V \quad (13)$$

琵琶湖沿岸メッシュにおける更新率と水深の積($f \cdot z$)および表面積負荷(L/A)の関係は図9のようになることから、ここでは、これに個々の琵琶湖沿岸部メッシュと符合する負荷量曲線を描くことにより、琵琶湖沿岸部メッシュごとの減衰係数を定めた。

3.3 湖内水質分布推定精度の検証

算定された沿岸部メッシュ水質データをもとにして、スプライン補間法を適用することにより琵琶湖内全メッシュの水質を算定した。琵琶湖内の環境基準点において1985年に測定された年平均水質をもとに、スプライン補間法を用いて求めた水質分布を初期値として、本システムにより1986年から1998年までの13年間の流入負荷量—水質分布シミュレーションを行った。この間に各環境基準点で測定された年平均水質と本システムによる計算値の関係を図10に示す。両者の関係は、TNで相関係数0.476、平均相対誤差17.0%、TPで相関係数0.638、平均相対誤差50.6%となり、時間経過とともに徐々に悪くなる傾向がある。「3.1」における算定精度と比べると本予測による再現精度は落ちるものの、沿岸部メッシュに入力されている流入負荷量自体の予測精度の影響も受けていることを考えると、この水質分布予測手法による琵琶湖水質の評価は充分可能だとしてよい。

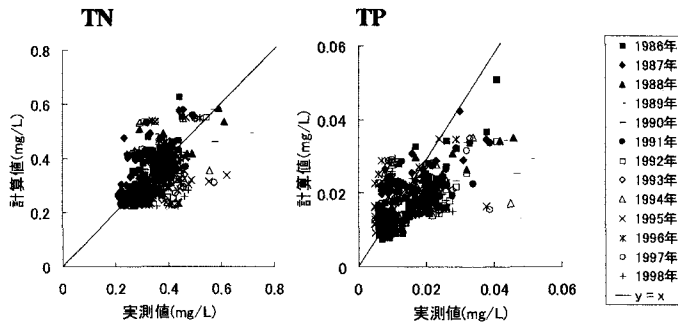


図10 流入負荷量予測値を用いた湖内水質の推定値と実測値の関係 (1986年～1998年)

4. 湖内水質分布の変化特性に関するシミュレーション解析

1986年から1998年までのシミュレーション結果のうち、渇水年である1994年(年降水量1254mm)と平年よりやや降水量の多かった1998年(年降水量1981mm)について、流入河川流域ごとの流入負荷量と湖内水質の分布を図11に示す。湖内水質の実測データ⁸⁾によると、年平均水質にみられる1994年の渇水の影響は、北湖におけるTNで顕著な濃度低下があるものの、南湖のTNや北湖のTPでは必ずしも大きくなく、南湖におけるTPでは逆に濃度が悪化しているケースも見受けられる。これは、夏の渇水時期における流入負荷量の減少による一時的な湖内水質の低下と、その後の降雨によって一気に起こる流域からの堆積汚濁流入による湖内水質の悪化とが複雑に絡み合っているためである。本シミュレーションによると、TNでは、流入負荷量、湖内水質とも、年降水量による差は必ずしも大きくなく、そのため北湖における渇水による湖内水質の濃度低下も顕著には現れていない。一方TPでは、渇水によって流入負荷量が概ね減少しており、これにともなって北湖東岸部の湖内水質が低下している。渇水年では、流入負荷量が少ないながらも流入水量の減少もそれ以上に大きいことから、受水域の容量の小さい南湖では、高濃度の流入成分が原因であろう水質の悪化が認められる。このように本予測手法を用いることにより、流域の社会変化や自然条件の変化に応じた琵琶湖への流入負荷量と湖内水質分布の評価・検討が可能となる。

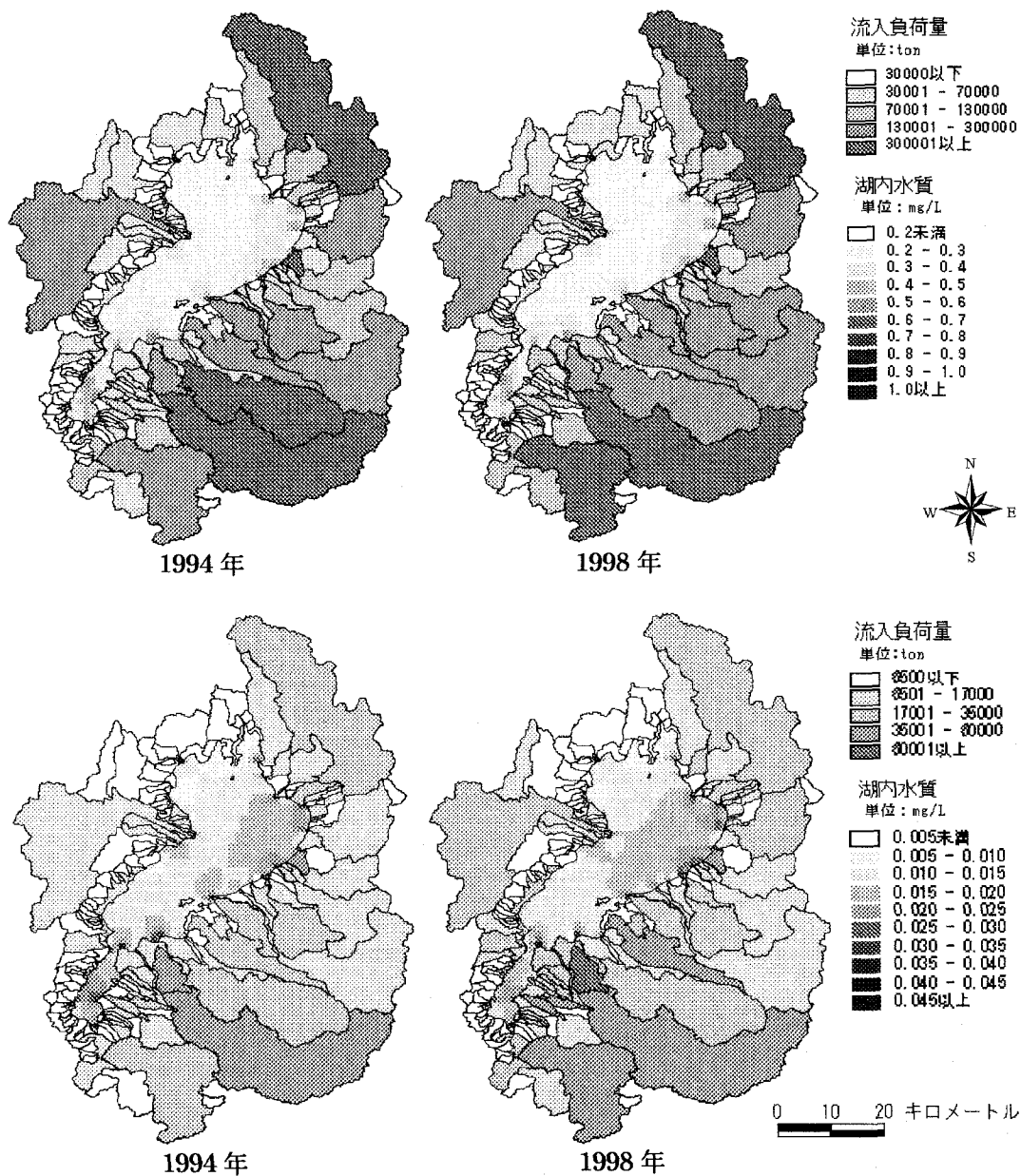


図11 流入負荷量と湖内水質分布の予測結果
(左: 1994年、右: 1998年)

5. まとめ

琵琶湖における流域特性をもとに流入負荷量を推定し、ついでこの流入負荷量の推定値をもとに湖内の水質分布を推定する一連の予測手法について基礎的な検討を試み、その有効性を示した。今後、さらに検討を進めることにより、GIS データおよび流入負荷量と湖内水質分布の予測を統合するコンピュータシステムの

開発を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1)市木敦之, 山田淳:GIS を用いた琵琶湖集水域からの汚濁物流出管理データベースの開発, 河川情報研究, No.7, pp.17-23, 1999
- 2)増田貴則:GIS を活用した流域環境情報の統合化とその現象解析・計画論への適用に関する研究—琵琶湖流域を対象として—, 京都大学博士論文, 2000
- 3)市木敦之, 山田淳, 大西敏之:流域特性を考慮した汚濁物流出プロファイルの予測, 環境システム研究, Vol.22, pp.68-77, 1994
- 4)A.Ichiki, T.Yamada and K.Yamada: GIS Application to Estimate Runoff Pollutant Loads from Lake Biwa Watershed, Japan, Urban Drainage Modeling, American Society of Civil Engineering, pp.701-712, 2001
- 5)A.Ichiki, T.Yamada, A.Sasaki, K.Amano and K.Yamada: Availability of a GIS Application for Pollutant Runoff from Lake Biwa Watershed, Japan, 9th International Conference on the Conservation and Management of Lakes, Session 5, pp.345-348, 2001
- 6)永礼英明, 宗宮功, 藤井滋穂;琵琶湖の水中内栄養塩存在量の推定, 水環境学会誌, Vol.25, No10, pp.599-604, 2002
- 7)市木敦之, 大西敏之, 山田淳:水環境における市街地ノンポイントソースの定量評価—栄養塩に関するシミュレーション解析—, 環境システム研究, Vol.23, pp.12-19, 1995
- 8)滋賀県:滋賀県環境白書—資料編—, 1984-1999
- 9)藤原正弘, 宗宮功, 津野洋, 藤井滋穂:水質汚濁濃度分布パターンのスプライン法による推定と合理的測定点配置の検討, 水質汚濁研究, Vol.8, No.2, pp.100-109, 1985
- 10)松梨史郎, 今村正裕:閉鎖性海域の富栄養化の可能性と許容される窒素・リンの負荷量に関する研究, 土木学会論文集, Vol.VII-17, No.664, pp.11-20, 2000