

湖沼における内部生産を考慮した COD水質分布の予測手法に関する基礎的研究

STUDY ON COD DISTRIBUTION IN CONSIDERATION OF
INTERNAL PRODUCTION IN LAKE

市木敦之¹・坂田典久²・佐々木暁人³・仲倉香菜子⁴・田井義一⁵
Atsushi ICHIKI, Norihisa SAKATA, Akito SASAKI, Kanako NAKAKURA and Yoshikazu TAI

¹正会員 工博 立命館大学助教授 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

²正会員 工修 いであ株式会社 国土環境研究所 (〒224-0025 横浜市都築早渕2-2-2)

³非会員 工修 高槻市役所 (〒569-0067 大阪府高槻市桃園町2-1)

⁴正会員 吹田市役所 (〒564-8550 大阪府吹田市泉町1-3-40)

⁵非会員 D&I情報システム株式会社 (〒560-0083 大阪府豊中市新千里西町1-2-13)

Lake Biwa is the largest lake in Japan, and water quality in the lake is heterogeneous. Therefore, it is important for water quality management that spatial distribution of water quality in the lake should be cleared. The objectives of this study are to examine and show a methodology to estimate COD distribution in a lake such as Lake Biwa taking consideration of internal COD production. This study also aims to simulate transition of COD distribution in Lake Biwa using the methodology.

In the result, it was shown that the methodology shown here is available to estimate COD distribution in a lake, and that it had possibility to explain a recent phenomenon of COD increase in Lake Biwa.

Key Words : *complete mixture model; GIS; internal production of COD; Lake Biwa; Macro Model; water quality distribution*

1. はじめに

琵琶湖のように広大かつ湖内の水質が不均質である湖沼では、湖内水質の空間的な分布を把握できていることが水質管理上重要である。筆者らは、これまで琵琶湖集水域のGISデータベース^{1),2)}に汚濁物流出モデルであるマクロモデル³⁾を組み込んだ汚濁物流出管理支援システムを開発し⁴⁾、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できる本システムの有効性を示してきた⁵⁾。さらに、本システムによる流入負荷量の推定値をもとに、湖内の栄養塩水質分布を予測する一連の方法論について示した⁶⁾。しかしながら、有機物など保存性の低い指標については、内部生産等の湖内における水質変化を特に考慮に入れていない本予測手法をもって、湖内水質形成過程を予測するには必ずしも充分であるとは言えないのが現状である。本論文は、有機汚濁の指標であるCODについて、湖沼における水質分布の予測手法を

構築することを目的として、湖内におけるCODの内部生産を考慮した方法論について、琵琶湖を事例に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。多くの場合、琵琶湖の水質については、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ため、ここでも表層水質を予測の対象とした。

2. 外来性COD水質分布の予測

(1) COD流入負荷量の推定

外来性COD算定部（図-1）では、まず集水域からのCOD負荷量が流入河川別に算定される。用いら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),6),7)}で示されている。マクロモデルの基礎式（(1)式～(10)式）とCODに関するモデルパラメータを表-1に示す。

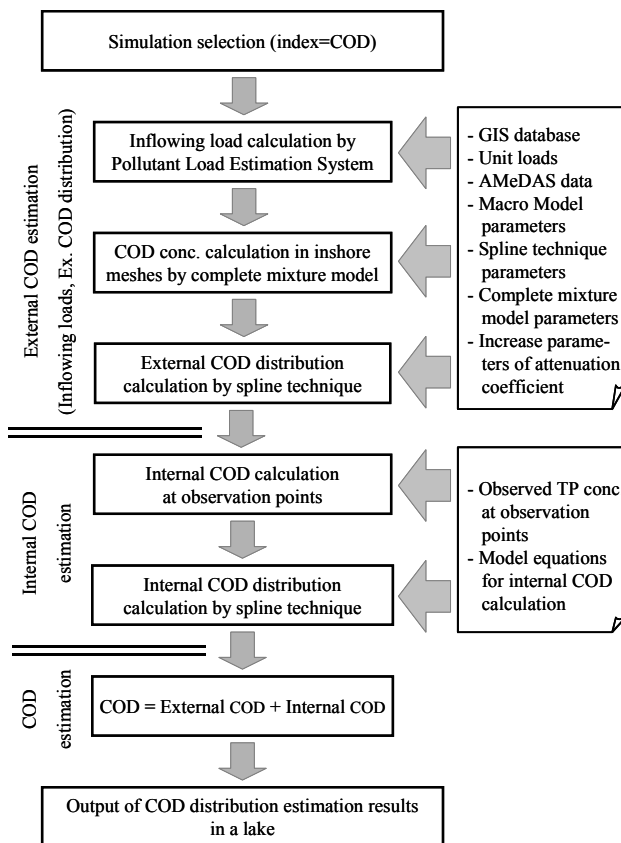


図-1 COD水質分布予測処理フロー。

表-1 マクロモデルの基礎式とモデルパラメータ。

	Basic equations	Indices	COD
Dry period	$L_{pv} = (L_{p01} + L_{p02} + L_{p03})(X/100)$ (1)	Accumulation ratio y (%)	63.85
	$L_{pu} = (L_{p01} + L_{p02} + L_{p03})(1-X/100)$ (2)		
	$dS_p/dt = L_{pv}(y/100) - L_{pr}$ (3)	S_{nu}/A_{3i}	Residential 0.396
	$dS_n/dt = k_{n3} S_{nu} \exp(-k_{n3} T)$ (4)	(t/km^2)	Commercial 1.049
			Industrial 3.100
		k_{n3} (1/day)	Highway 1.651
Wet period			Roof 0.176
	$L_{ps} = L_{pu}(1-y/100)$ (5)	L_{ns4}/A_4	Irrigated 19.991
	L_{ps} ($i=4, 6$) are constant per unit area for each land use, but L_{ns4} in not-irrigated period is C (6)	($kg/km^2 day$)	Not-irrigated 0.000
		L_{ns6}/A_6	Irrigated 2.675
		($kg/km^2 day$)	Not-irrigated 2.675
	$L_{pr} = k_p S_p^a Q_r^b$ (7)	k_p ($\times 10^{-4}/km^2$)	8.364
Wet period	$L_{pr3} = S_{n1} [1 - \exp(-k_{n3} R)]$ (8)	k_{n3} (d/mm)	0.058
	$L_{ni} = k_{ni} Q_r^b$ ($i=4-6$) (9)	k_{n4}/A_4 ($\times 10^{-2}/km^2$)	5.276
	$b = \alpha X + \beta$ (10)	k_{n5}/A_5 ($\times 10^{-2}/km^2$)	18.859
		k_{n6}/A_6 ($\times 10^{-2}/km^2$)	2.739
		α ($\times 10^{-3}$)	4.740
		β	0.688

* Variables

L : Pollutant loads (kg/day) S : Accumulated loads (kg)

X : Removal ratio of point source pollutants (%)

y : Accumulation ratio of point source pollutants during dry period (%)

* Subscripts

p : Point source (d: domestic, i: industrial, o: service)

n : Nonpoint source (3: urban, 4: paddy field, 5: cropland, 6: mountainous)

o : generation u : untreated v : treated s : dry period r : wet period

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。たとえば琵琶湖の場合、アメダスによる気象観測地点は、集水域内に13地点あるため、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ることとした。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。

(2) 完全混合モデルによる沿岸部COD水質の推定

琵琶湖を事例とする場合、湖面を1kmメッシュに分割し、流入河川や在来水路からの流入がある沿岸部メッシュ（計233メッシュ）を決定し、各メッシュの流入水量や流入負荷量、下水処理場放流水を入力する（図-2）。各沿岸部メッシュの中は深さ1mの完全混合ボックスモデルで表せるものと考え、(11)式により負荷量収支を計算するものとした。

$$CV = \{C_0 V + C_{in} Q_{in} - (C_0 V + C_{in} Q_{in}) / (V + Q_{in}) Q_{out}\} (1 - \sigma) \quad (11)$$

ここで、Cは沿岸部メッシュ水質(mg/L)、Vは沿岸メッシュ容積(m^3)、 C_{in} は流入水質(mg/L)、 Q_{in} は流入流量(m^3/day)、 C_0 は湖内水質(mg/L)、 Q_{out} は下流メッシュへの移流流量(m^3/day)である。また、 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($ton/km^2/day$)を用いてVollenweider型の(12)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⁸⁾。

$$L/A = (C - C_0) f z + C \sigma z + C_0 Q_{in} z / V \quad (12)$$

琵琶湖における栄養塩について示された沿岸部メッシュにおける更新率と水深の積(fz)および表面積負荷(L/A)の関係⁶⁾を参考に、CODについて同様の関係の概略を示すと図-3のようになる。減衰係数 σ を変化させて個々の沿岸部メッシュを通過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 σ を定めることとした。

(3) 湖内水質分布の推定

算出された沿岸部メッシュにおけるCOD水質予測値を用いて、湖内メッシュにおけるCOD水質分布を予測し、それを外来性COD水質分布とした。ここに、外来性COD水質分布は、内部生産がないと仮定した場合に流域からの流入成分のみによって得られるCOD水質分布である。湖内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⁹⁾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、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¹⁰⁾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。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におけるスプライン補間法の基礎式を(13)式に示す。

$$C_{x,y} = \{ (8+nh^2) (C_{x+1,y} + C_{x-1,y} + C_{x,y+1} + C_{x,y-1}) - 2(C_{x+1,y+1} + C_{x-1,y+1} + C_{x+1,y-1} + C_{x-1,y-1}) - (C_{x+2,y} + C_{x-2,y} + C_{x,y+2} + C_{x,y-2}) \} / (20+4nh^2) \quad (13)$$

ここに、 $C_{x,y}$ はメッシュ(x, y)における水質 (mg/L) , n はスプラインパラメータ (n=1.0) , hはメッシュ幅である (h=1km) . スプライン補間の繰り返し計算は、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 0.001mg/L, を超えなくなるまで続けた。

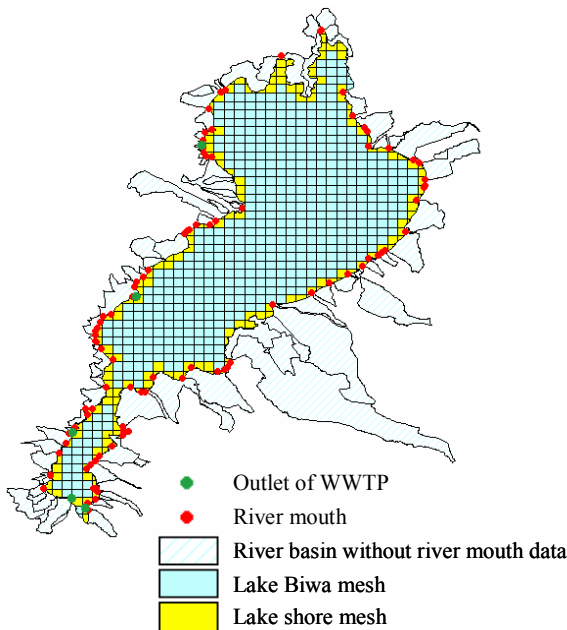


図-2 琵琶湖内のメッシュ分割.

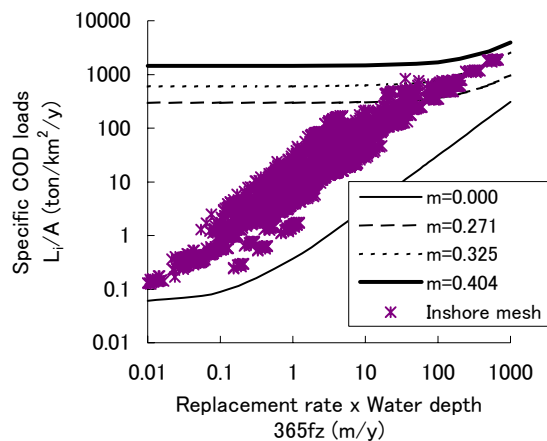


図-3 琵琶湖沿岸部メッシュにおける負荷量曲線 (COD) .

3. 内部生産COD水質の予測

湖内のCODを外来性CODと内部生産CODに分けて考える場合、内部生産CODは、クロロフィルa(Chla)や制限栄養塩濃度と良い相関のあることが知られている。福島ら¹¹⁾は、湖沼におけるCODとChlaの関係が線形回帰できることから、水域ごとにChla=0となる時のCODや、COD実測データの最小値を外来性CODとする方法を提案している。ここでは、福島ら¹¹⁾の検討と同じく考え、琵琶湖内で1983年から1998年にかけて測定された水質データ(47地点)について、各測定地点におけるChlaの最小値(Chla_{min})が測定された時のCOD(COD₀)を外来性CODとみなすものとした。Chla_{min}とCOD₀の関係は図-4のようになることから、両者の関係は(14)式で定式化することができる。

$$COD_0 = 0.571 \times Chla_{min} + 1.951 \quad (14)$$

ここに、COD₀はChla=Chla_{min}のときのCOD(外来性COD)(mg/L)、Chla_{min}は各水質測定地点におけるChlaの最小値(μg/L)である。これにより、各水質測定地点において測定されたCODの年平均值(COD_{ave})から外来性のCOD₀を引くことにより、内部生産性CODの年平均值(COD_{p-ave})が求められる。琵琶湖はリン制限の湖であることから、制限栄養塩であるTPの年平均值(TP_{ave})とCOD_{p-ave}の関係を図示すると図-5のようになり(15)式を得る。

$$COD_{p-ave} = 14.0 \times TP_{ave}^{0.859} \quad (15)$$

ここに、COD_{p-ave}は各水質測定地点における内部生産CODの年平均值(mg/L)、TP_{ave}は同TPの年平均值(mg/L)である。琵琶湖内における内部生産COD水質の予測に(15)式を用い、外来性COD水質の予測同様、スプライン補間法を用いると湖内全体の内部生産COD水質分布が推定できる。

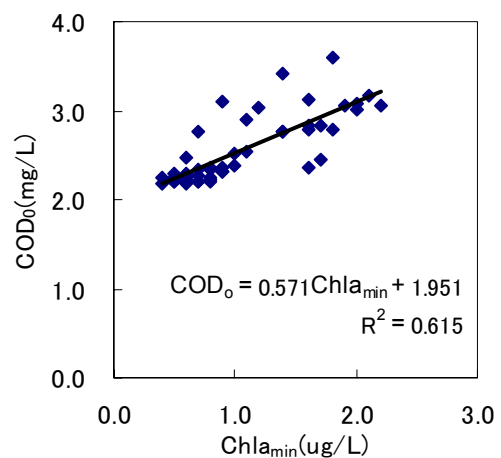


図-4 水質測定地点におけるCOD₀とChla_{min}の関係.

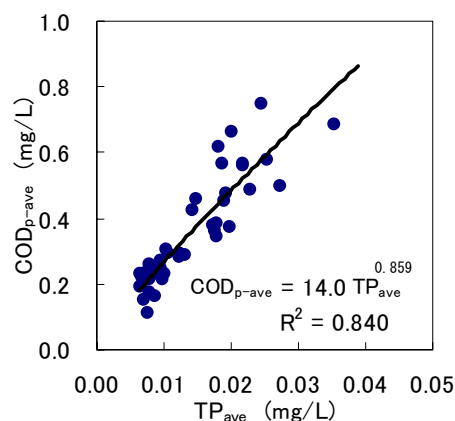


図-5 内部生産性 $\text{COD}_{p\text{-ave}}$ と TP_{ave} の関係.

4. 琵琶湖におけるCOD水質分布の予測と再現性

琵琶湖集水域における1986年から1998年までの13年間の流域特性データを用いて、流入負荷量－水質分布シミュレーション（図-1）を行った。シミュレーションでは、まず、マクロモデルを用いて流入河川別に日々のCOD、TP負荷量を算定した。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。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日単位のアメダス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、計算対象年ごとの人口や産業構造、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。ついで、河口の位置データとこの流入負荷量をもとに、(11)式を用いて各沿岸部メッシュ内の水質を算定した。この際、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。また、沿岸部メッシュにおけるTPは逐次(15)式を用いて内部生産CODに変換した。算定された沿岸部メッシュ水質データをもとにして、(13)式を用いた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外来性CODおよび内部生産COD水質をそれぞれ算定した。この間に各環境基準点で測定された外来性・内部生産をあわせたCODの年平均水質と本システムによる計算値の関係を図-6、表-2に示す。両者の関係は、時間経過とともにばらつきがあるものの、平均相関係数0.73、平均相対誤差12.9%となった。沿岸部メッシュに入力されている流入負荷量自体に既に一定の推定誤差がある⁷⁾ことや、もともと同じ年の同一地点においても実測値自体にばらつきがあることから、これらを差し引いて考えると本水質分布予測手法の再現性は満足できるものである。

湖内の水質測定点（47地点）におけるCODの実測値と推定値の経年変化（1986～1998年）をそれぞれ図-7、図-8に、また、内部生産COD推定値と外来性COD推定値の経年変化をそれぞれ図-9、図-10に示す。一般にいわれているように、実測COD水質の変動に関しては、北湖、南湖ともに年々漸増傾向があるが（図-7）、本推定計算による変動は大きくない（図-8）。内部生産CODは年々減少している（図-9）ことから、琵琶湖におけるCOD水質が改善しない要因の一つとして外来性CODの削減が今なお十分に進んでいない（図-10）ことが考えられる。

1986年から1998年までのシミュレーション結果のうち、平年より渇水年であった1994年（年平均降水量1254mm）とやや豊水年であった1995年（年平均降水量1925.3mm）について、流入河川流域ごとの流入負荷量と湖内水質分布のシミュレーション予測を行った結果を図-11～図-14に示す。図-11、図-12の外来性COD水質分布の予測では、流入負荷量が高い値を示している流入河川付近の沿岸部メッシュにおける水質汚濁が著しいが、渇水年と豊水年の違いは必ずしも明瞭ではない。一方、図-13、図-14の内部生産COD水質分布の予測では、特に北湖における渇水年と豊水年の水質汚濁状況の違いが明瞭である。また、南湖についても、東岸部において渇水による水質汚濁の進行がみてとれる。

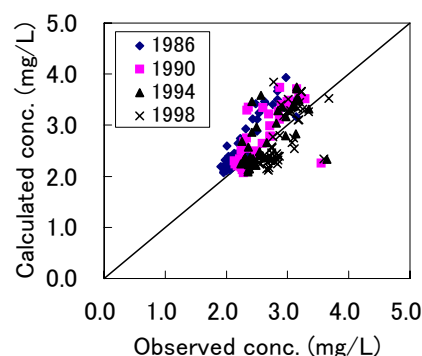


図-6 COD水質分布推定値と実測値の関係.

表-2 COD水質分布推定値と実測値の相関係数と相対誤差.

Year	Correlation coefficient	Relative error
1986	0.918	16.1
1987	0.864	13.9
1988	0.654	32.5
1989	0.696	12.2
1990	0.726	10.4
1991	0.721	10.7
1992	0.746	9.0
1993	0.697	9.4
1994	0.692	10.0
1995	0.764	9.9
1996	0.688	10.7
1997	0.691	10.4
1998	0.638	12.4

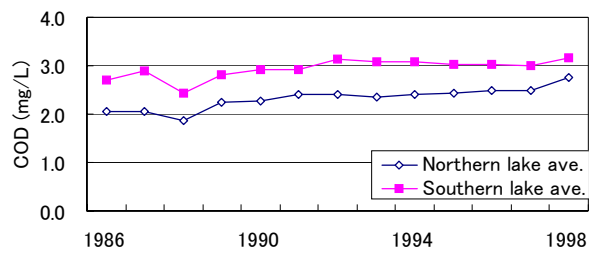


図-7 CODの経年変化（実測値）。

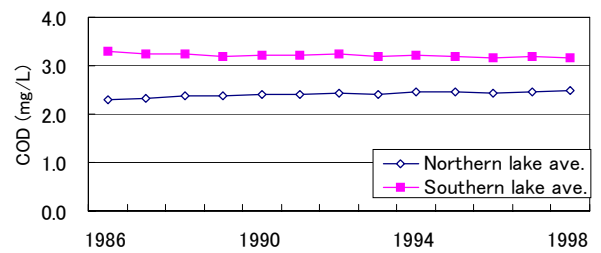


図-8 CODの経年変化（推定値）。

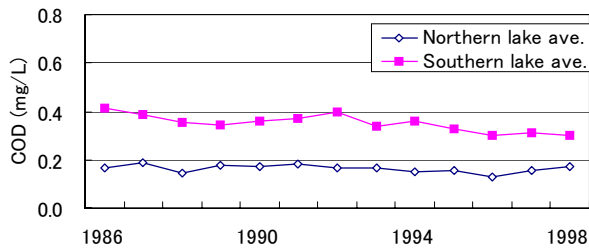


図-9 内部生産COD推定値の経年変化。

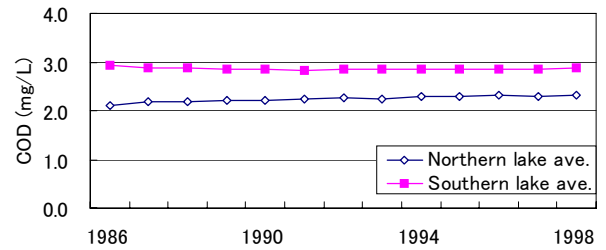


図-10 外来性COD推定値の経年変化。

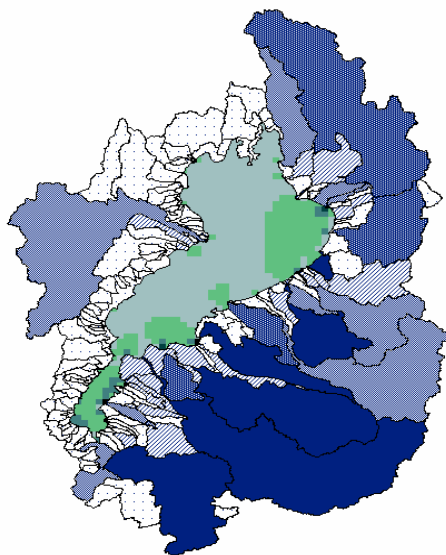


図-11 外来性COD水質分布（1994年）。

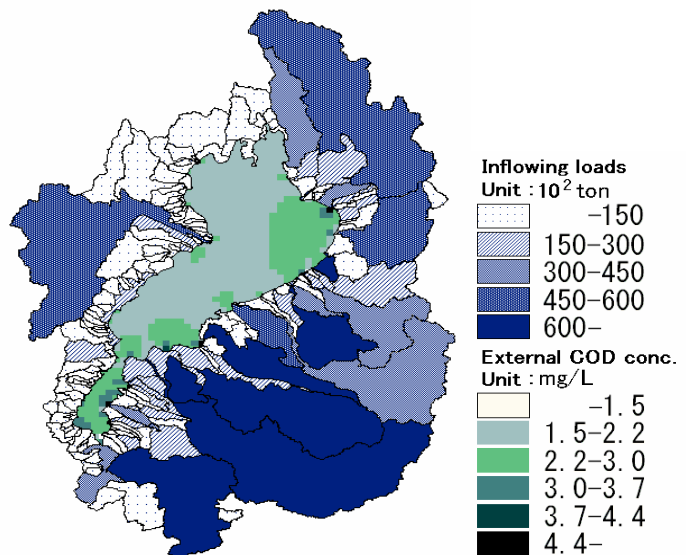


図-12 外来性COD水質分布（1995年）。

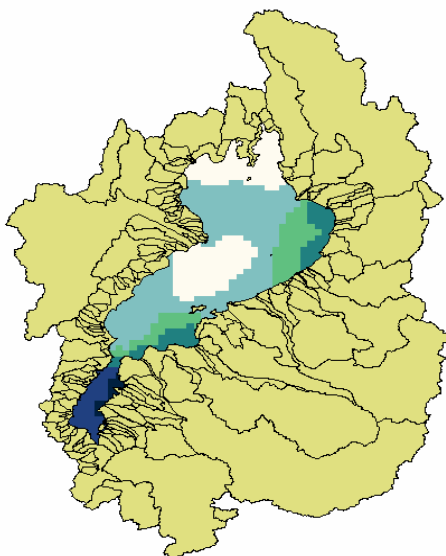


図-13 内部生産COD水質分布（1994年）。

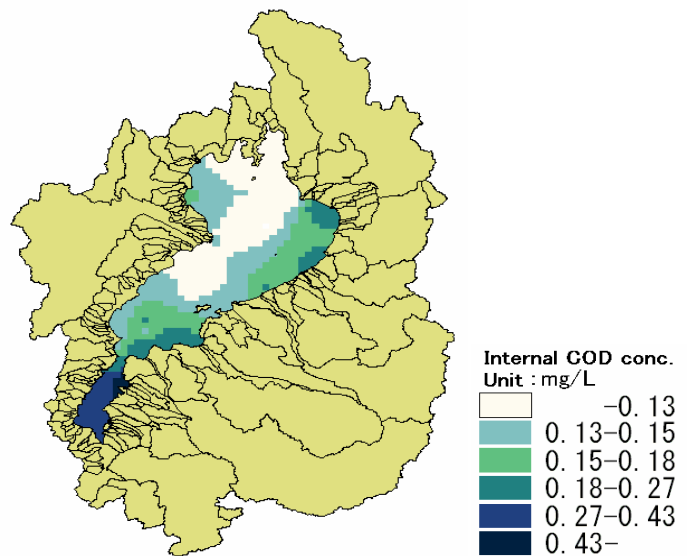


図-14 内部生産COD水質分布（1995年）。

5. まとめ

本論文では、湖沼における内部生産CODについて考察するとともに、これを考慮したCOD水質分布を予測する以下の手法を提案した。

- (1) 集水域のGISデータベースをもとにマクロモデルを用いてCOD流入負荷量を算定する。
- (2) COD流入負荷量をもとに完全混合モデルおよびスプライン補間モデルを用いて外来生CODの水質分布を算定する。
- (3) 制限栄養塩であるTPの水質分布をもとにより内部生産CODの水質分布を算定する。

本手法により、琵琶湖集水域からの流入負荷量、流量といった流域側の情報と、琵琶湖内における内部生産COD水質濃度、湖岸部における外来性COD水質分布といった水域内の情報をGIS上でオーバーレイすることで、琵琶湖内における有機汚濁状況を満足のいく再現性をもって記述することが可能となった。また、本手法によるシミュレーション計算により、以下の事柄を示した。

- (1) 湖内COD水質の経年変化を外来生CODと内部生産CODの別に示し、琵琶湖のCOD水質が改善しないことの要因に外来生CODの削減が充分に進んでいないことが考えられることを示した。
- (2) 1986年から1998年までの13カ年間のCOD流入負荷量と水質分布を明らかにした。

しかしながら、本手法では、滞留時間の長い北湖に比べて、湖水が比較的速く流動している南湖における再現性が高くないこともあわせて明らかとなったため、今後さらに検討を進めることにより本手法のシステム化と改良を図りたいと考えている。

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) 市木敦之, 佐々木明人, 坂田典久, 仲倉香菜子, 山手博之: 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, 環境工学研究論文集, vol. 40, pp. 183-191, 2003.
- 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) 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.
- 9) 滋賀県: 滋賀県環境白書—資料編—, 1984-1999
- 10) 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
- 11) 福島武彦, 天野耕二, 村岡浩爾: 湖沼水質の簡易な予測モデル—2. 湖水栄養塩濃度と内部生産COD, クロロフィルaとの関係—, 水質汚濁研究, Vol. 9, No. 12, pp. 775-785, 1986.

(2006. 9. 30受付)