

湖沼水質シミュレーションモデルの開発

吉川 昌範・宇都宮 高栄・田賀 幹生*・加藤 賢二

Development of Lake Water Qualities Simulation Model

Masanori YOSHIKAWA, Takae UTSUNOMIYA, Mikio TAGA, Kenji KATOU

Abstract

We developed the Simulation Model of lake water qualities covering the Five Lakes of Mikata and the Lake Kitagata with the personal computer.

We found a good correlation between the calculated values by the Model and the surving values. Using this Model, we evaluated the relation between the cut rate of material quantities and the decrease rate of water qualities.

1 緒 言

三方五湖および北潟湖は漁業、農業のほか県民の憩いの場として広く利用され、特に観光資源として県民にとって貴重な資産となっている。

しかし、両湖（三方五湖のうち日向湖を除く）とも全国湖沼の例にもれず、閉鎖性水域特有の富栄養化現象がみられ、平成元年度から発生源対策、流入水路対策、湖沼内対策および湖沼周辺対策を柱とした「湖沼水質保全対策事業」を実施している。

今回、当該事業の一環として、三方五湖（日向湖を除く）および北潟湖の水質シミュレーションモデルの開発を行い、負荷削減と水質との関係を求めたので、その結果について報告する。

2 湖沼の概要

三方五湖は、日向湖、久々子湖、水月湖、菅湖および三方湖の五湖からなる若狭湾に面する総面積約11km²の鹹水・汽水・淡水湖であり、昭和62年に日向湖を除く4湖について、窒素・りんに係る環境基準（IV類型）が設定されている。

利水目的は水産であり、こい、わかさぎ、しじみ等の漁業権が免許されている。主な流入河川として三方湖に入る鱒川がある。

なお、今回は環境基準の設定されている4湖（以下、「三方五湖」という。）を解析対象とした。

北潟湖は、北東から南西方向の谷に沿って細長くのびる全長約6km、総面積約2.2km²の日本海に面す

る汽水湖であり、三方五湖同様、昭和62年に窒素・りんに係る環境基準（IV類型）が設定されている。

利水目的は、農業用水と水産であり、こい、ふな、うなぎ等の漁業権が免許されている。主な流入河川として湖の中心部に入る観音川がある。また湖末端部において大聖寺川が合流している。

3 解析方法

図1の解析フロー図に示すように水質調査、水理調査、流入水量調査、背景負荷量調査および湖内変動量調査から求めた各種データを用いてシミュレーションを実施し、現況との照合から水理モデルおよび水質モデルの妥当性を検証した後、そのモデルを使って負荷削減と水質との関係を求めた。

3.1 解析期間

解析期間は、平成3年4月から平成4年3月までの1年間とした。

3.2 使用データ

3.2.1 水質データ

図2に示した調査地点における上層または下層の年10回の測定値を用いた。

3.2.2 潮位および湖水面位データ

潮位および湖水面位については、運輸省第一港湾建設局、県土木事務所、三方町および当センターが測定した値を、それぞれフーリエ解析によりSin関数として表したものの¹⁾（以下、「潮位関数」という。）を用いた。

*現 県民生活部環境保全課

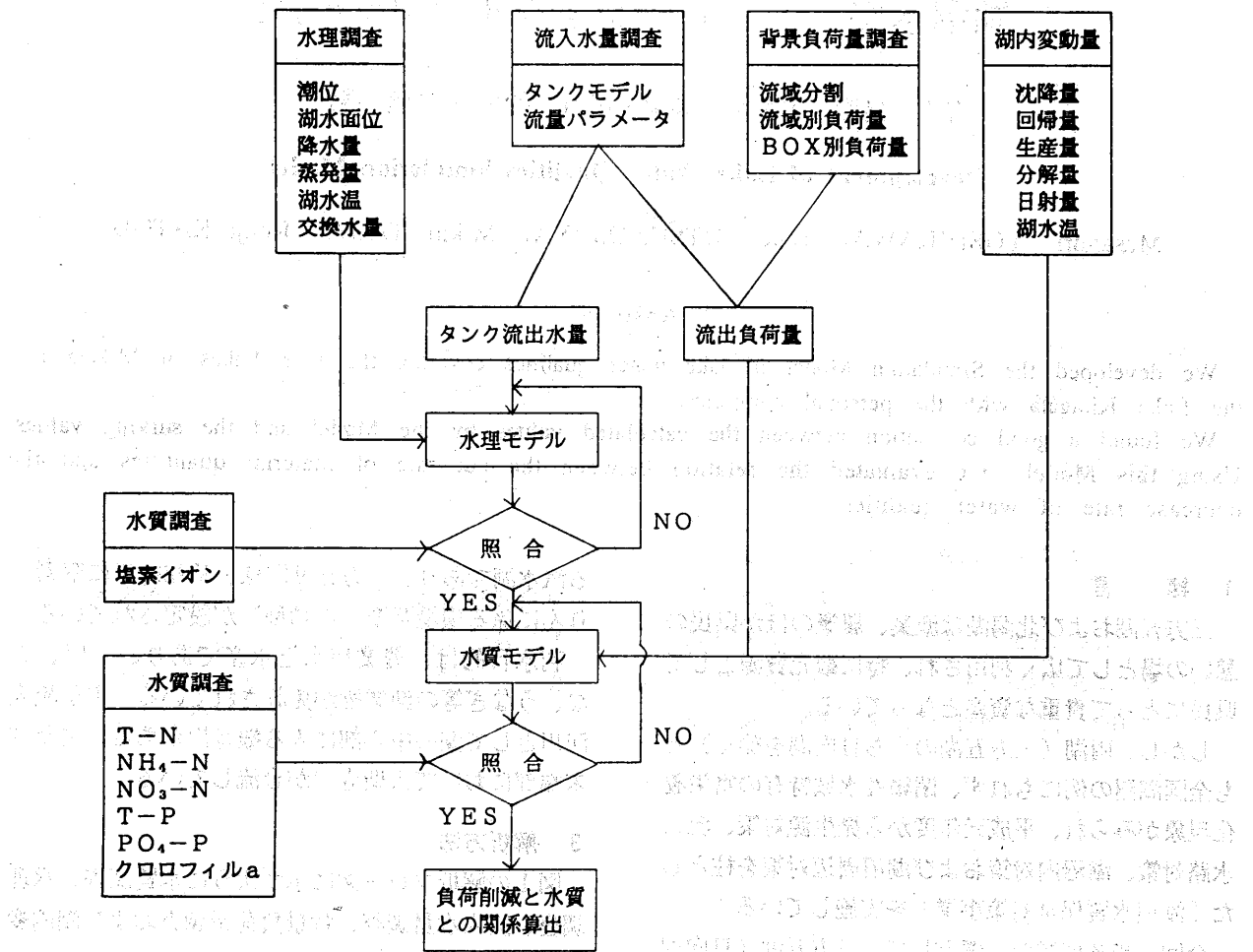
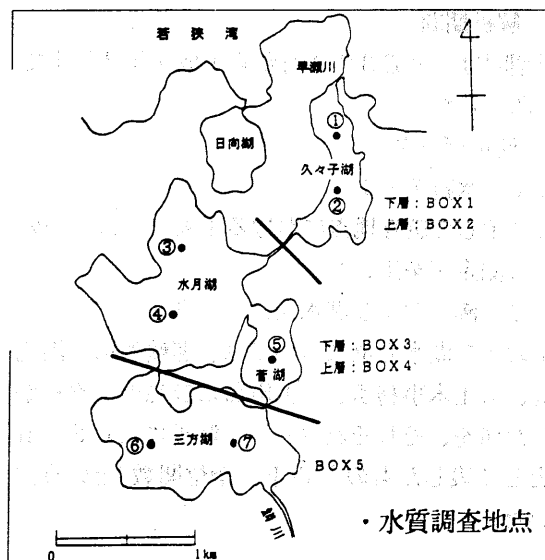


図1 解析フロー図

[三方五湖]



[北潟湖]

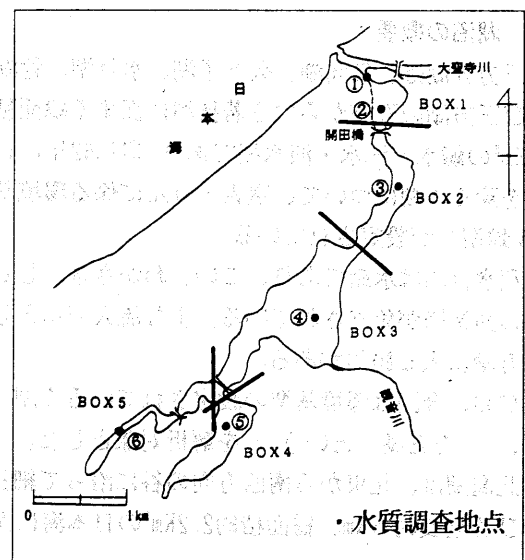


図2 水質調査地点およびボックス分割図

3.2.3 湖面降水量および湖面蒸発量

湖面降水量については、本報で宇都宮らが報告した中央集中型降雨パターン²⁾をもとに、アメダスの日降水量（三方五湖は美浜、北潟湖は三国）を計算時間毎に分割した値を用いた。

湖面蒸発量は、他湖の調査事例を参考に推定した年間蒸発量 600mm³⁾をもとに、蒸発量が湖水面温度に比例すると仮定して算出した日蒸発量を用いた。

3.2.4 流入水量

流域からの流入水量については、宇都宮らが報告した3段直列タンクモデル⁴⁾の流量パラメータを年間一定として、時間降水量から算出した値を用いた。地下水量については、前出のタンクモデルから求めた値や府中湖の値⁵⁾等を参考に推定した値（三方五湖は降水量の20%、北潟湖は降水量の16%）を用いた。

3.2.5 流入負荷量

窒素、りんの流入負荷量は、原単位法などにより積み上げた背景負荷量調査結果（年間値）をもとに、タンクモデルによる流出パターンを用いて計算時間毎に算出した負荷量を用いた。

また、地下水および湖面降水による窒素、りんの流入負荷量はすべて無機態として扱い、雨水の実測濃度に地下水量および湖面降水量を乗じて算出した値を用いた。

3.2.6 湖内変動量

湖内で変動する沈降量、回帰量、生産量および分解量等については、実測値や文献値^{8~10)}を参考に推定した値を計算初期値として用いた。

4 シミュレーションモデル

湖沼のシミュレーションモデルは、一般に水理モデルと水質モデルに分けられ各々の組合せで構築される。

今回は、水理モデルとして水域を複数ボックスに分割し、そのボックス内は完全混合であると仮定したボックス型水理モデルを、水質モデルとして湖沼内の内部生産を考慮した物質循環型水質モデルをそれぞれ作成した。

4.1 ボックス型水理モデル

4.1.1 ボックス分割と諸元

湖の形態、水質濃度および躍層等を考慮して、各湖を図2に示したように5ボックスに分割した。

各ボックス諸元は表1、表2のとおりである。

表1 ボックス諸元（三方五湖）

	水深 (m)	湖面積 (km ²)	湖容積 (千m ³)	流域面積 (km ²)	水質 調査地点
BOX1	1.0~1.5	1.40	700	—	②の下層
BOX2	0~1.0	1.40	1,400	13.89	①② の各上層
BOX3	8.0~19.5	5.08	58,420	—	④の下層
BOX4	0~8.0	5.08	40,640	5.76	③④⑤ の各上層
BOX5	0~1.4	3.60	5,040	62.93	⑥⑦ の各上層

表2 ボックス諸元（北潟湖）

	水深 (m)	湖面積 (km ²)	湖容積 (千m ³)	流域面積 (km ²)	水質 調査地点
BOX1	0~1.81	0.170	308	0.76	②の上層
BOX2	0~2.63	0.292	769	1.65	③の上層
BOX3	0~3.12	1.098	3,430	22.40	④の上層
BOX4	0~2.21	0.408	903	5.37	⑤の上層
BOX5	0~1.62	0.252	407	3.97	⑥の上層

4.1.2 モデルの概要

モデルの概要は図3¹¹⁾に示すとおりである。

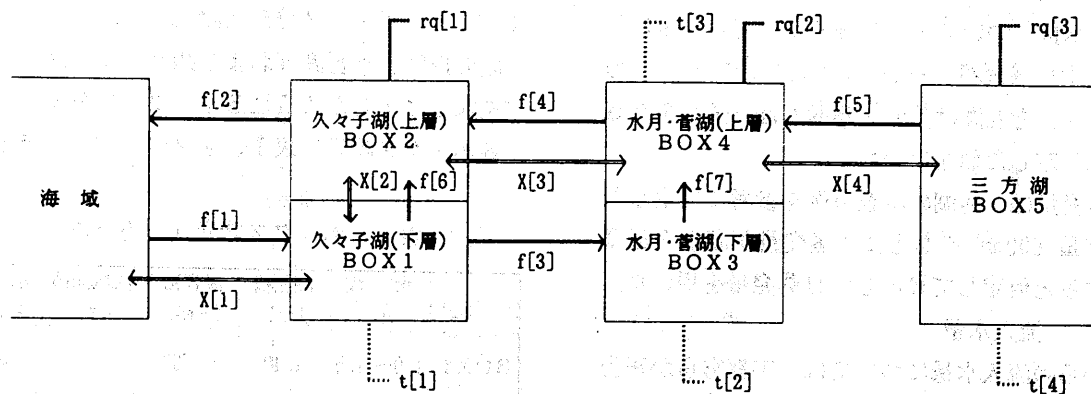
河川水量、地下水量、湖面降水量、湖面蒸発量、農業取水量および湖容積変化量（潮位関数をもとに算出）から、移流量に関する均衡式を下記のとおり設定した。

また、干満によるボックス間の交換水量（ $X[n]$ ）を想定し、潮位関数（ $H[t]$ ）の一次式

$$X[n] = a \times H[t] + b \quad (a, b \text{ はパラメータ})$$

であらわされる未知数としてモデルに与え、シミュレーションにより決定した（モデルの確定）。

[三方五湖]



[北潟湖]

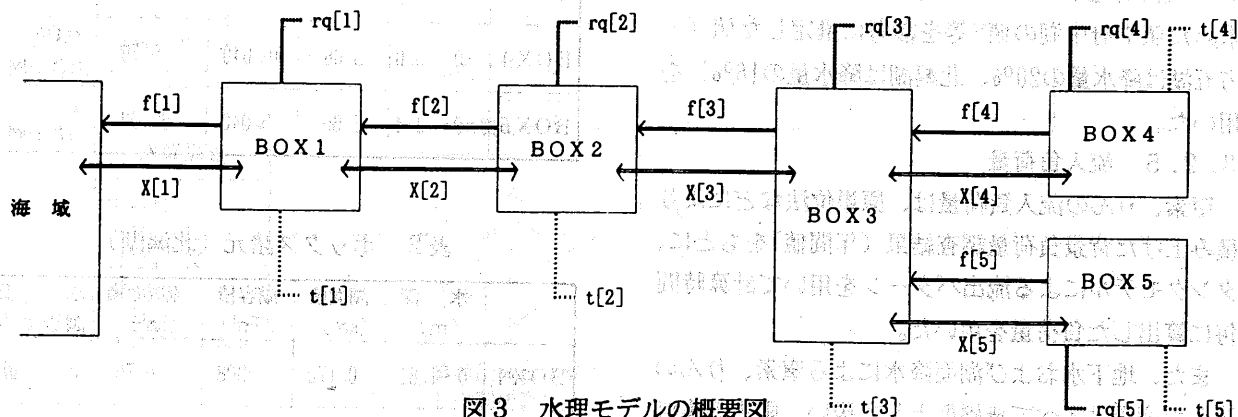


図3 水理モデルの概要図

なお、シミュレーションは、両湖とも海に面していることに着目して、塩素イオンをトレーサ物質として実施した。

[均衡式]

(三方五湖)

$$f[7] = t[2] - dv[3]$$

但し、 $dv[3] \geq 0$ の場合 $f[7] = t[2]$

$$f[6] = t[1]$$

$$f[5] = rq[3] + t[4] - dv[5]$$

$$f[4] = rq[2] + f[5] + f[7] + t[3]$$

$$f[3] = dv[3]$$

(但し、 $dv[3] < 0$ の場合 $f[3] = 0$)

$$f[2] = rq[1] + f[6] + f[4]$$

$$f[1] = f[3] + dv[1]$$

(北潟湖)

$$f[5] = rq[5] + t[5] - dv[5]$$

$$f[4] = rq[4] + t[4] - dv[4]$$

$$f[3] = rq[3] + f[4] + f[5] + t[3] - dv[3]$$

$$f[2] = rq[2] + f[3] + t[2] - dv[2]$$

$$f[1] = rq[1] + f[2] + t[1] - dv[1]$$

但し、

$f[n]$: 移流量

$rq[n]$: 河川水量 + 湖面降水量 - 湖面蒸発量 - 農業取水量

$t[n]$: 地下水量

$dv[n]$: 湖容積変化量

4. 1. 2. 1 計算単位時間

計算単位時間は、

① 雨による洪水到達時間が1～3時間¹²⁾である。

② 湖内生産を考慮する場合、少なくとも昼夜の区

分(12時間)が必要である。

③計算単位時間が短い場合、湖容積以上の水量を一時に動かす不合理が生じる。

ことなどから6時間に設定した。

4.1.2.2 境界値濃度

塩素イオンの主な供給源は海域であること、また交換水量は海の潮位により変化すると仮定していることから、海側の値(境界値)をどうとらえるかが重要であり、今回は次のように設定した。

三方五湖……湖末端は早瀬川を経て海域に流れていること、また久々子湖の塩素イオン濃度の月変動が大きいことから、早瀬川において海水と久々子湖の水が1対1で混合していると仮定し、その値を境界値とした。

北潟湖……湖末端は大聖寺川と合流して海域に流れていることから、海域の塩素イオン濃度を用いることは不適切であり、湖末端(調査地点①)の実測値を境界値とした。

4.1.2.3 北潟湖開田橋の水門について

北潟湖の開田橋に水門があり、農業用取水の関係から4月～10月の間は、BOX2の水位がBOX1より高いと開、低いと閉にする自動開閉方式をとっている。

したがって、その期間中はBOX2とBOX3で潮位の影響が小さくなる(交換水量が少なくなる)と仮定し、交換水量に係数 α を乗じて計算した(シミュレーション結果から $\alpha=0.1$ を採用)。

4.1.3 計算方法

湖の上流側のBOXから順に交換水量(パラメータ a , b)を変化させながら、計算BOXにおいて計算塩素イオン濃度が実測値に最も近づく交換水量をそれぞれ算出する。

最初に、計算BOXより下流のBOXの塩素イオン濃度として、年10回の実測値を365日の日データに直線補完した値を用いて、BOX5からBOX1まで順に交換水量を変化させながらシミュレーションを実施し、塩素イオン計算値を算出する。

次に、その計算値を下流BOXの塩素イオン濃度として用い、再度BOX5からBOX1まで交換水量を変化させながらシミュレーションを実施し、最適な交換水量を決定した。

4.2 物質循環型水質モデル

4.2.1 モデルの概要

塩素イオン照合で確定したボックス型水理モデルに窒素、りん的光合成生産、沈降および回帰等に関する下記の関係式¹⁰⁾を組み込んだモデルを作成し、窒素、りんの実測値との再現性を検証しながら、光合成生産、沈降、回帰等に関する各種パラメータ値を決定した(モデルの確定)。

なお、生産については、プランクトン(クロロフィル a で評価)が無機態の窒素、りんを吸収して増殖し、プランクトンが枯死して有機態となり、さらに有機態が分解して無機態になると仮定した。

また、三方五湖のBOX3からBOX4への窒素、りんの移流は、塩分躍層の関係からないものと仮定するとともに、北潟湖のBOX4、BOX5については、水質に対して流入負荷量が少ないことからBOX3への窒素、りんの移流は水の移流に対して少ないと仮定した(計算では、BOX4からBOX3へは水移流の50%、BOX5からBOX3へは水移流の85%となった)。

[光合成生産、沈降、回帰等に関する関係式]

温度関数 F_t

$$F_t = 0.116 + 0.0088T + 0.00106T^2$$

$$T = 9.5 \times \sin(0.0172 \times (d + 335)) + 17.6 \text{ [三方五湖]}$$

$$T = 10.1 \times \sin(0.0172 \times (d + 341)) + 16.9 \text{ [北潟湖]}$$

栄養塩関数 F_{np}

$$F_{np} = (ID_n / (K_{mn} + ID_n)) \times (ID_p / (K_{mp} + ID_p))$$

照度関数 F_i

$$F_i = I / (I + K_i)$$

増殖速度 G_p

$$G_p = \mu_{\max} \times F_{np} \times F_i \times F_t$$

有機態分解量 Q_1 (g/day)

$$Q_1 = AR \times T \times OD \times V$$

無機態回帰量 Q_2 (g/day)

$$Q_2 = SV \times A \times T$$

有機態沈降量 Q_3 (g/day)

$$Q_3 = SR \times A \times OD$$

クロロフィル a 濃度 CHL (g/m³)

$$CHL = (I + G_p - D_p \times T) \times CHL$$

無機態濃度 ID (g/m³)

$$ID = ID + ((Q_1 + Q_2) / V) - G_p \times C_f \times CHL$$

有機態濃度 OD (g/m³)

$$OD = OD - ((Q1 + Q3)/V) + Dp \times T \times Cf \times CHL$$

T : 温度 (°C)

K_{mn}, K_{mp} : 半飽和定数

ID_n, ID_p : 窒素、りん無機態濃度 (g/m³)

K_i : 照度定数 (MJ/m²/day)

I : 日射量 (MJ/m²/day)

μ_{max} : 最大比増殖速度 (1/day)

V : 湖容積 (m³)

A : 湖面積 (m²)

AR : 有機態分解速度 (1/day)

SV : 回帰速度 (g/m²/day/°C)

SR : 沈降速度 (m/day)

D_p : プランクトン枯死速度 (1/day/°C)

C_f : クロロフィル a 換算係数

4.2.2 計算方法

当該モデルで用いるパラメータが10種以上あるため、あらかじめ文献等からパラメータの計算初期値を設定し、その近傍でパラメータを変化させながらシミュレーションを実施して、窒素（無機態、有機態、クロロフィル態）およびりん（無機態、有機態、クロロフィル態）の計算値が全BOXにおいて実測値とよく一致するようにパラメータ値を決定した。

なお、回帰量以外のパラメータ値はできるかぎり全BOX共通になるよう考慮した。

また、計算単位時間は水理モデル同様、6時間とした。

5 計算結果

5.1 交換水量

ボックス型水理モデルから求められた交換水量および湖への海水流入量の実測値¹³⁾¹⁴⁾を表3、表4に示した。

表からわかるように、計算から求められた交換水量は海水流入量の実測値と同レベルにあった。このことから、当該モデルは水の流況をよくとらえているモデルと考えられる。

表3 計算交換水量および実測値(三方五湖)

	計算値(m ³ /s)	実測値(m ³ /s)
X[1]	1.22~14.98	0 ~ 10
X[2]	1.30~ 2.23	—
X[3]	0.81~ 3.38	0 ~ 9
X[4]	1.07	0 ~ 2.5

表4 計算交換水量および実測値(北潟湖)

	計算値(m ³ /s)	実測値(m ³ /s)
X[1]	2.55~ 4.97	0 ~ 4
X[2]	0~10.53	0 ~ 7
X[3]	0~37.56	—
X[4]	0~ 3.08	0 ~ 2
X[5]	0.02	—

5.2 塩素イオン照合結果

ボックス型水理モデルを使って塩素イオンの現況照合を行った結果、計算値と実測値の相関係数は、図4、図5に示すように三方五湖で0.969、北潟湖で0.922（ともに有意水準1%以内）であり良好な結果であった。

5.3 物質循環型水質モデルの各種パラメータ値

窒素、りんについて、モデルによる計算値と実測値が最もよくシミュレートするよう求めた光合成生産、沈降、回帰等に関する各種パラメータ値は表5のとおりであり、実測値や文献から求められている値に近い値が得られ良好な結果であった。

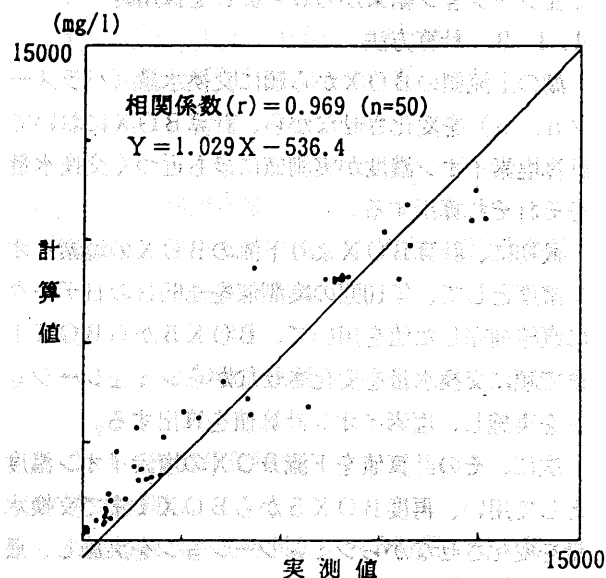


図4 計算値と実測値の相関図(三方五湖)

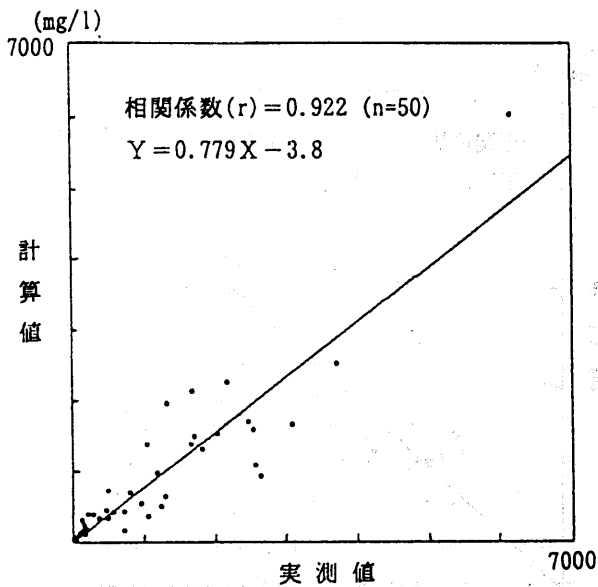


図5 計算値と実測値の相関図（北潟湖）

表5 水質モデルのパラメータ値

回帰速度 S_V (mg/m ² /day/°C)	[三方五湖] 窒素：0.95～1.73 (0.12～0.49) リン：0.10～0.21 (0.06～0.17) [北潟湖] 窒素：1.0～4.0 (0.15～10.8) リン：0.25～0.47 (0.05～2.25)
有機態分解速度 A_R (1/day/°C)	0.002 (0.009)
カロリ換算係数 C_f	[三方五湖] 窒素：18.3 (14.6) リン：1.55 (1.55) [北潟湖] 窒素：8.5 (8.5) リン：0.94 (0.94)
沈降速度 S_R (m/day)	0.25～0.65 (0.51)
フラクトン枯死速度 D_p (1/day/°C)	0.0024 (0.0035)
半飽和定数 K_{mn}, K_{mp}	K_{mn} ：0.069 (0.069) K_{mp} ：0.0025 (0.002)
照度係数 K_i (MJ/m ² /day)	2.26 (2.26)
最大比増殖速度 μ_{max} (1/day)	0.98 (0.80)

（ ）内の値は実測値または文献値⁶⁾～¹⁰⁾

5.4 窒素、りん照合結果

物質循環型水質モデルを使って窒素（T-N）、りん（T-P）の現況照合を行った結果、計算値と実測値の相関係数は図6～図9に示すように、三方五湖で窒素 0.769、りん 0.902、北潟湖で窒素 0.845、りん 0.733（ともに有意水準1%以内）であり良好な結果が得られた。しかし、参考資料に示したBOX別の計算値（経日変化）と実測値の比較図からわかるように、濃度変動の比較的大きいBOXでは、計算値の実測値に対する追従がやや悪い結果となった。また、三方五湖の海側のボックス（BOX1）では、計算値が実測値よりも窒素で約2割、りんでは約3割低い値となった。これは、BOX1の水と海水を1対1で混合させた水質を境界値として用いたことが原因の一つであると思われる、境界値の設定がモデル構築のうえで重要な要素の一つであることを示唆しているものと考えられる。

5.5 負荷削減と水質との関係

物質循環型水質モデルを使ってBOX別（負荷は主に上層から流入するため下層のBOXは除外）に窒素、りんの負荷削減率と水質改善率の関係を求めた。

なお、関係を求める際には、負荷削減に伴う底質改善（回帰量の減少）のファクターをどうとらえるかが重要と考えられるが、現時点では不明であるため、短期的な評価として回帰量を不変とした場合と、長期的な評価として負荷削減率と同率で回帰量を減少させた場合についてそれぞれ試算した。

試算結果は表6、表7のとおりであり、回帰量不変の場合、全BOXにおいて窒素、りんともに水質改善率は負荷削減率の5割程度であった。また、回帰量を減少させた場合には、全BOXにおいて窒素、りんともに水質改善率は負荷削減率の9割程度となった。

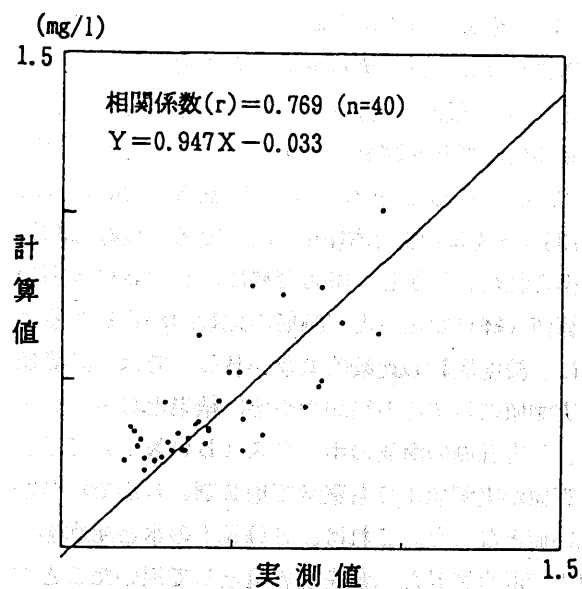


図6 計算値と実測値の相関図（三方五湖：窒素）

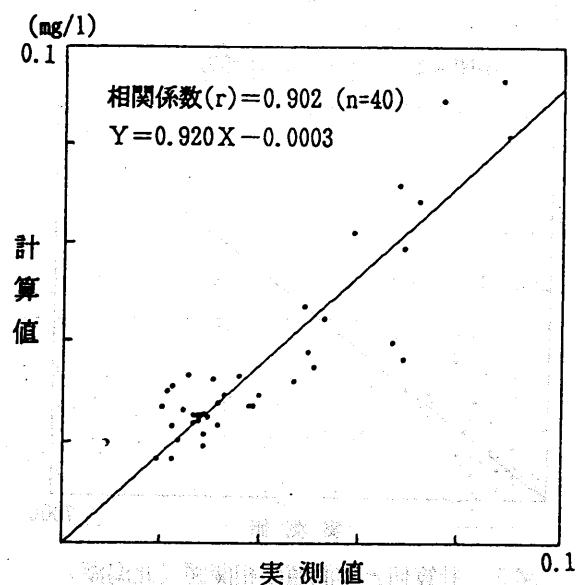


図7 計算値と実測値の相関図（三方五湖：りん）

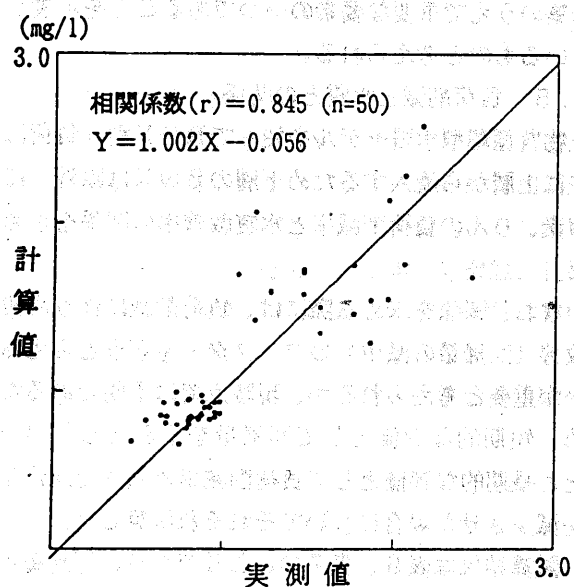


図8 計算値と実測値の相関図（北潟湖：窒素）

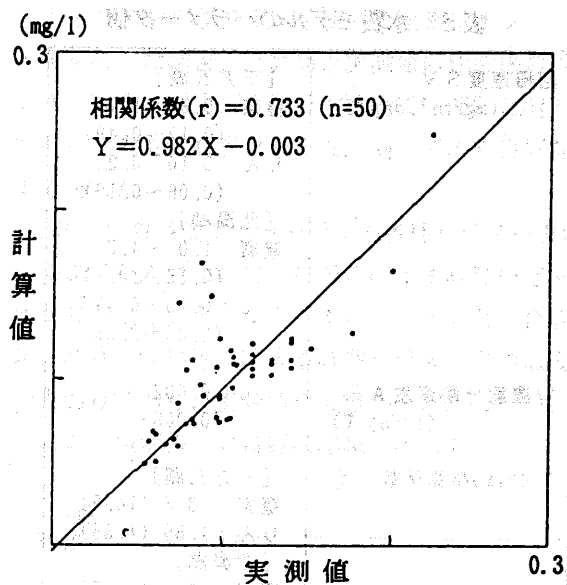


図9 計算値と実測値の相関図（北潟湖：りん）

表6 負荷削減率と水質改善率の関係(回帰量不変)

	窒素 (T-N)		りん (T-P)	
	三方五湖	北潟湖	三方五湖	北潟湖
BOX 1	—	X=0.565T	—	X=0.556T
BOX 2	X=0.605T	X=0.498T	X=0.552T	X=0.469T
BOX 3	—	X=0.490T	—	X=0.471T
BOX 4	X=0.545T	X=0.409T	X=0.522T	X=0.448T
BOX 5	X=0.514T	X=0.623T	X=0.431T	X=0.630T

X：水質改善率 T：負荷削減率

表7 負荷削減率と水質改善率の関係(回帰量減少)

	窒素 (T-N)		りん (T-P)	
	三方五湖	北潟湖	三方五湖	北潟湖
BOX 1	—	X=0.845T	—	X=0.867T
BOX 2	X=0.832T	X=0.913T	X=0.897T	X=0.956T
BOX 3	—	X=0.927T	—	X=0.972T
BOX 4	X=0.815T	X=0.908T	X=0.870T	X=1.030T
BOX 5	X=0.923T	X=0.939T	X=0.985T	X=1.024T

X：水質改善率 T：負荷削減率

6 まとめ

今回、三方五湖および北潟湖を対象として1年間の基礎データをもとに湖沼水質シミュレーションモデルの開発を試みた。その結果

(1)シミュレーションにより求められたモデルの各種パラメータ値は、実測値や文献値に近い値であった。

(2)モデルによる窒素、リンの計算値と実測値の間に良い相関が認められた。

これらのことから、今回開発したモデルは両湖沼の水質把握に有効であると考えられる。また、当該モデルを使って窒素、リンの負荷削減率と水質改善率の関係を求めたところ、水質改善率は、回帰量不変の場合に負荷削減率の約5割、負荷削減に応じた回帰量減少の場合には約9割となった。

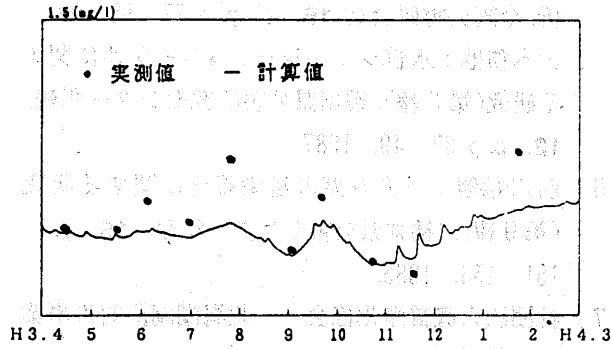
今後は、境界値の適切な設定をはじめ多年度にわたる基礎データの収集やモデルの改良を検討し、湖沼水質シミュレーションモデルとしての精度向上を図っていきたい。

参考文献

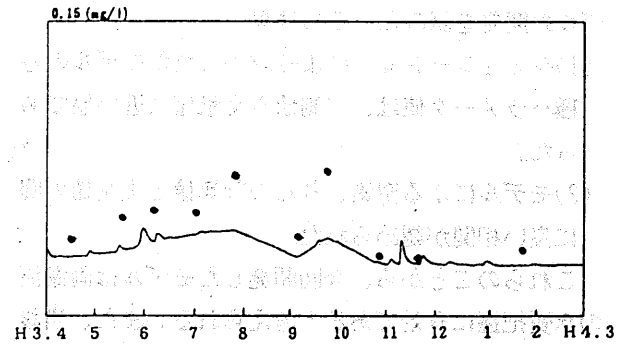
- 1) 加藤賢二他：福井県の汽水湖における湖水面の変動関数について、福井県環境センター年報，**22**，p. p. 56-60，1992.
- 2) 宇都宮高栄他：降雨時汚濁負荷量の調査研究について、福井県環境センター年報，**20**，p. p. 148-154，1990.
- 3) (財)日本気象協会福井支部：「湖沼富栄養化環境基準設定事業汚濁解析調査報告書」，p. 15，1987.
- 4) 宇都宮高栄他：観音川の降雨時汚濁負荷量の解析，全国公害研会誌，**16**，(2)，p. p. 77-88，1991.
- 5) 山本務他：水質シミュレーションモデルに関する研究(第3報)，香川県公害研究センター所報，**12**，p. p. 37-49，1987.
- 6) 前川勉他：三方五湖の富栄養化に関する研究(第9報)，福井県公害センター年報，**15**，p. p. 151-154，1985.
- 7) 社団法人底質浄化協会：「北潟湖湖沼対策事業調査委託報告書」，1990.
- 8) 社団法人底質浄化協会：「三方湖湖沼対策事業調査委託報告書」，1990.
- 9) 前川勉他：北潟湖の水質について(第5報)，福井県公害センター年報，**9**，p. p. 241-246，1981.
- 10) 岩佐義朗：「湖沼工学」，山海堂，東京，1990.
- 11) (財)日本気象協会福井支部：「水質汚濁解析業務報告書(北潟湖および三方五湖の水質汚濁解析調査)」，1992.
- 12) 福井県環境センター：「降雨時汚濁負荷量調査結果」，1992.
- 13) 福井県：「昭和55年度環境庁委託業務結果報告書(湖沼水質管理指針策定調査)」，p. 9，1981.
- 14) 福井県生活環境部：「北潟湖水質環境調査報告書」，p. 35，1982.

参考資料1 計算値と実測値の比較図（三方五湖－BOX別）

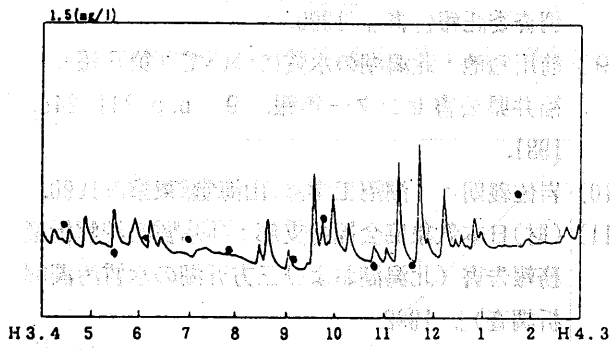
全窒素－BOX1－



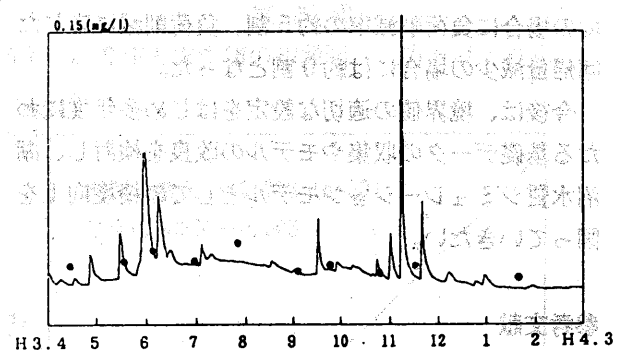
全リン－BOX1－



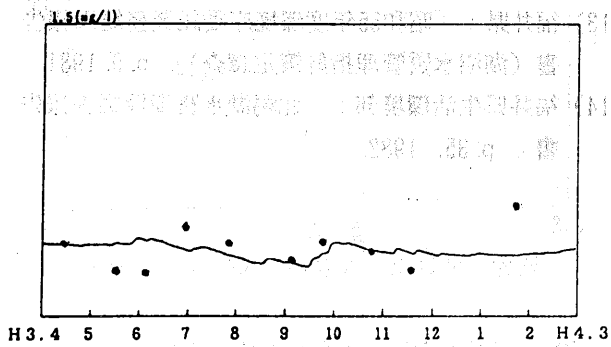
全窒素－BOX2－



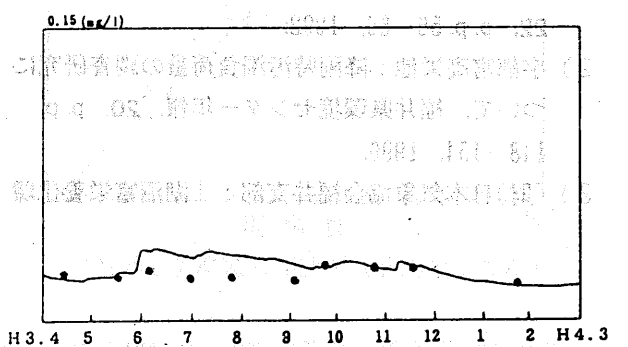
全リン－BOX2－



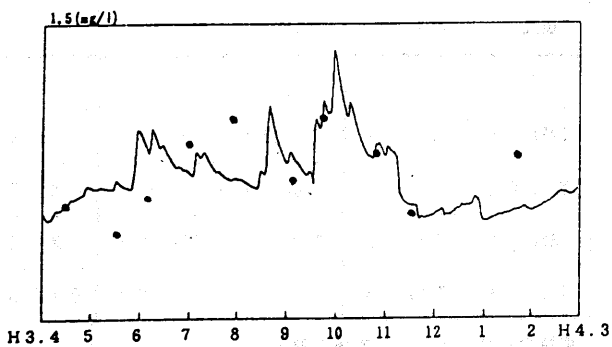
全窒素－BOX4－



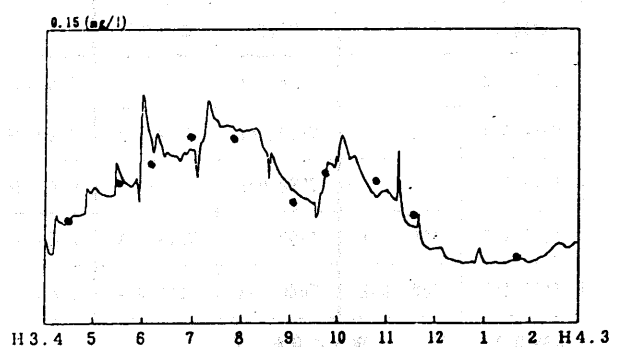
全リン－BOX4－



全窒素－BOX5－



全リン－BOX5－



参考資料2 計算値と実測値の比較図（北潟湖－BOX別）

