

## 15. 井の頭池における水質シミュレーション

### Water Quality Simulation in the Inokashira Pond

技術支援課 高崎忠勝、岩屋俊夫、杉原大介

#### 1. はじめに

神田川の源である井の頭池は武蔵野市と三鷹市にまたがる井の頭恩賜公園の中に位置しており、人々の憩いの場となっている。以前、井の頭池周辺には豊富な湧水が存在し、江戸時代には飲用水の水源となっていた。昭和30年代以降になると湧水量が減少し池の水量・水質の維持が問題となり、地下水からの導水やばっ気用噴水の設置、浚渫の実施等が行われてきた<sup>1)</sup>。しかし、1年を通じて井の頭池の底が見えない状況が続いており、水質改善は大きな課題となっている。

井の頭池の水質改善を図る場合、既に井の頭池で行われている手法も含めて多くの手法が考えられるが、どのような手法を用いる場合でも池内の植物プランクトンの増殖を上回る規模の対策を行わないと池の水質改善は期待できない。よって水質浄化施設等を導入する際には、事前に施設稼働後の池の水質変化を推定し、目標とする水質が得られることを確認しておくことが望まれる。

水質浄化施設等による池の水質変化の推定において水質シミュレーションモデルを用いる手法が考えられる。霞ヶ浦や印旛沼湖等の水質汚濁が進行した閉鎖性水域では、水質特性の把握や水質改善施策の検討において水質シミュレーションが多く用いられている<sup>2)3)</sup>。井の頭池においても水質シミュレーションを利用しながら池の水質管理を行っていくことが有効だと考える。

本報は井の頭池を対象にした水質シミュレーションモデルについて、モデルで用いている計算式やシミュレーションに必要なデータ等を説明する。また、シミュレーションの例を示し、水質改善を検討する際のツールとしての有用性を述べる。

#### 2. 水質シミュレーションモデルの概要

井の頭池は図 - 1 に示すように、お茶の水池、弁天池、ポート池からなるY字形の池で、面積は約42,000m<sup>2</sup>、平均水深は約1.6m、池の水量は約69,000m<sup>3</sup>となっている。池の水量と水質の維持を目的として日量約3,600m<sup>3</sup>の地下水が導水されている<sup>4)</sup>。

井の頭池では透明度の低下が問題となっており、千葉県による印旛沼・手賀沼を対象とした水質シミュレーションモデル<sup>3)5)6)</sup>と同様の手法を用いてクロロフィルa、COD、窒素、りんを対象にした物質循環モデルを構築した。



図 - 1 井の頭池

本モデルは井の頭池全体を1つのボックスで表しており、日単位の水質変化を計算する。

### (1) 計算式

以下にモデルで用いている計算式を示す。

#### 1) クロロフィルa

クロロフィルa濃度は式(1)で計算される。

$$C = C_C + C_D + C_G \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $C$ ：クロロフィルa濃度 (mg/l)、 $C_C$ ：クロロフィルa濃度 (藍藻) (mg/l)、 $C_D$ ：クロロフィルa濃度 (珪藻) (mg/l)、 $C_G$ ：クロロフィルa濃度 (緑藻) (mg/l)。

藍藻、珪藻、緑藻のクロロフィルaの変化量は個々に式(2)、式(3)で計算される。

$$\frac{dC_i}{dt} = -\frac{C_i q}{V} + P_{ri}(1-\varepsilon) - k_r C_i - k_d C_i - \frac{v_{pl} C_i}{h} \quad \text{式(2)}$$

$$P_{ri} = \mu_{\max i} \frac{N_i}{N_i + K_N} \frac{P_i}{P_i + K_P} \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \frac{T}{T_{opt}} \exp\left(1 - \frac{T}{T_{opt}}\right) C_i \quad \text{式(3)}$$

ここに、 $C_i$ ：藍藻、珪藻、緑藻のクロロフィルa濃度 (mg/l)、 $t$ ：時間 (日)、 $q$ ：井の頭池への導水量 ( $m^3$ /日)、 $V$ ：池水量 ( $m^3$ )、 $v_{pl}$ ：植物プランクトンの分泌量/光合成量、 $k_r$ ：植物プランクトンの呼吸速度 (1/日)、 $k_d$ ：植物プランクトンの枯死速度 (1/日)、 $v_{pl}$ ：植物プランクトンの沈降速度 (m/日)、 $h$ ：平均水深 (m)、 $\mu_{\max}$ ：最大比増殖速度 (1/日)、 $N_i$ ：無機体窒素濃度 (mg/l)、 $K_N$ ：窒素の半飽和定数 (mg/l)、 $P_i$ ：無機体りん濃度 (mg/l)、 $K_P$ ：りんの半飽和定数 (mg/l)、 $I$ ：日射量 ( $MJ/m^2$ /日)、 $I_{opt}$ ：最適日射量 ( $MJ/m^2$ /日)、 $T$ ：水温 ( )、 $T_{opt}$ ：最適水温 ( )。

#### 2) COD

COD濃度は式(4)で計算される。

$$COD = C_o + \alpha_{CoC} C \quad \text{式(4)}$$

ここに、 $COD$ ：COD (mg/l)、 $C_o$ ：非生物態COD (mg/l)、 $\alpha_{CoC}$ ：植物プランクトンのCOD/クロロフィルa。

非生物態CODの変化量は式(5)で計算される。

$$\frac{dC_o}{dt} = -\frac{L_{Co}}{V} - \frac{C_o q}{V} - \gamma_{Co} C_o - \frac{v_{Co} C_o}{h} + \frac{R_{Co}}{h} + \alpha_{CoC} (k_d C + P_r \varepsilon) \quad \text{式(5)}$$

ここに、 $L_{Co}$ ：COD流入負荷量 (g/日)、 $\gamma_{Co}$ ：非生物態CODの分解速度 (1/日)、 $v_{Co}$ ：非生物態CODの

沈降速度 (m/日)、 $R_{Co}$ ：非生物態CODの溶出速度 (mg/日)。

#### 3) 窒素

全窒素濃度は式(6)で計算される。

$$TN = N_o + N_i + \frac{\alpha_{CoC}}{\alpha_{CoN}} C \quad \text{式(6)}$$

ここに、 $TN$ ：全窒素濃度 (mg/l)、 $N_o$ ：非生物態有機体窒素濃度 (mg/l)、 $\alpha_{CoN}$ ：植物プランクトンのCOD/窒素。

非生物態有機態窒素と無機態窒素の変化量はそれぞれ式(7)と式(8)で計算される。

$$\frac{dN_o}{dt} = -\frac{L_N(1-r_{Ni})}{V} - \frac{N_o q}{V} + \frac{\alpha_{CoC}}{\alpha_{CoN}} (k_d C + P_r \varepsilon) - \gamma_{No} N_o - \frac{v_{No} N_o}{h} \quad \text{式(7)}$$

$$\frac{dN_i}{dt} = -\frac{L_N r_{Ni}}{V} - \frac{N_i q}{V} - \frac{\alpha_{CoC}}{\alpha_{CoN}} P_r + \frac{\alpha_{CoC}}{\alpha_{CoN}} k_r C + \gamma_{No} N_o - \gamma_{Ni} N_i + \frac{R_{Ni}}{h} \quad \text{式(8)}$$

ここに、 $L_N$ ：T-N流入負荷量 (g/日)、 $r_{Ni}$ ：T-N流入負荷量のうち無機態窒素の占める割合、 $\gamma_{No}$ ：非生物態有機態窒素の分解速度 (1/日)、 $\gamma_{Ni}$ ：非生物態有機態窒素の沈降速度 (m/日)、 $N_i$ ：脱窒速度定数 (1/日)、 $R_{Ni}$ ：無機態窒素の溶出速度 (mg/日)。

#### 4) りん

全りん濃度は式(9)で計算される。

$$TP = P_o + P_i + \frac{\alpha_{CoC}}{\alpha_{CoN} \alpha_{NP}} C \quad \text{式(9)}$$

ここに、 $TP$ ：全りん濃度 (mg/l)、 $P_o$ ：非生物態有機態りん濃度 (mg/l)、 $\alpha_{NP}$ ：植物プランクトンの窒素/りん。

非生物態有機態りんと無機態りんの変化量の変化量はそれぞれ式(10)と式(11)で計算される。

$$\frac{dP_o}{dt} = -\frac{L_P(1-r_{Pi})}{V} - \frac{P_o q}{V} + \frac{\alpha_{CoC} \alpha_{NP}}{\alpha_{CoN}} (k_d C + P_r \varepsilon) - \gamma_{Po} P_o - \frac{v_{Po} P_o}{h} \quad \text{式(10)}$$

$$\frac{dP_i}{dt} = -\frac{L_P r_{Pi}}{V} - \frac{P_i q}{V} - \frac{\alpha_{CoC} \alpha_{NP}}{\alpha_{CoN}} P_r + \frac{\alpha_{CoC} \alpha_{NP}}{\alpha_{CoN}} k_r C + \gamma_{Po} P_o - v_{Pi} P_i + \frac{R_{Pi}}{h} \quad \text{式(11)}$$

ここに、 $\gamma_{Po}$ ：非生物態有機態りんの分解速度 (1/日)、 $v_{Po}$ ：非生物態有機態りんの沈降速度 (m/日)、 $L_P$ ：T-P流入負荷量 (g/日)、 $r_{Pi}$ ：T-P流入負荷量のうち無機態りんの占める割合、 $R_{Pi}$ ：無機態りんの

溶出速度 (mg/m<sup>2</sup>/日)、 $p_i$ : 無機態りんの沈降速度 (m/日)。

### 5) 温度依存性

以下の9種類の速度(植物プランクトンの呼吸速度  $k_r$ 、植物プランクトンの枯死速度  $k_d$ 、非生物態 COD の分解速度  $C_o$ 、非生物態有機態窒素の分解速度  $N_o$ 、非生物態有機態りんの分解速度  $P_o$ 、脱窒速度  $N_i$ 、非生物態 COD の溶出速度  $R_{Co}$ 、無機態窒素の溶出速度  $R_{Ni}$ 、無機態りんの溶出速度  $R_{Pi}$ ) は温度依存性を式(12)のように考慮している。

$$x_T = x_{20} \exp(a(T - 20)) \quad \text{式(12)}$$

ここに、 $x_T$ :  $T$  における速度 (1/日)、 $x_{20}$ : 20 における速度 (1/日)、 $a$ : 温度依存係数。

### (2) モデルパラメータ

式(1)~(12)で表される井の頭池水質シミュレーションモデルには表-1に示したように44個のパラメータがあり、計算前にこれらの値を設定する必要がある。パラメータに関連する調査の結果をもとに値を設定することが望ましいが、参考となる調査を行っていない場合は他の事例等を参照して値を設定することになる。

### (3) 入力データ

式(1)~(12)で表される井の頭池水質シミュレーションモデルは計算のために解析期間を通じた日あたりの平均水温、日射量、COD流入負荷量、T-N流入負荷量、T-P流入負荷量、流出量のデータを用意する必要がある。また、水質の初期値として解析期間初期におけるクロロフィルa濃度(藍藻、珪藻、緑藻)、非生物態COD濃度、非生物態有機態窒素濃度、無機態窒素濃度、非生物態有機態りん濃度、無機態りん濃度を入力する必要がある。

## 4. 井の頭池の水質特性の再現

本モデルを用いて1994年4月から1997年3月の期間を対象に井の頭池の水質変化を計算する。この期間は井の頭池で水質調査が行われており<sup>7)8)9)</sup>水質データが比較的揃っている。対象期間における井の頭池の水質特性を本モデルが再現するために、シミュレーションによる水質が水質調査結果の特徴を表せるよ

表-1 モデルパラメータ

パラメータ	単位
$\mu_{maxC}$ 最大比増殖速度(藍藻)	1/日
$\mu_{maxD}$ 最大比増殖速度(珪藻)	1/日
$\mu_{maxG}$ 最大比増殖速度(緑藻)	1/日
$K_N$ 窒素の半飽和定数	mg/L
$K_{PC}$ りんの半飽和定数(藍藻)	mg/L
$K_{PD}$ りんの半飽和定数(珪藻)	mg/L
$K_{PG}$ りんの半飽和定数(緑藻)	mg/L
$I_{optC}$ 最適日射量(藍藻)	MJ/m <sup>2</sup> /日
$I_{optD}$ 最適日射量(珪藻)	MJ/m <sup>2</sup> /日
$I_{optG}$ 最適日射量(緑藻)	MJ/m <sup>2</sup> /日
$T_{optC}$ 最適水温(藍藻)	
$T_{optD}$ 最適水温(珪藻)	
$T_{optG}$ 最適水温(緑藻)	
$\alpha_{CoC}$ 植物プランクトンのCOD/クロロフィルa	-
$\alpha_{CoN}$ 植物プランクトンのCOD/窒素	-
$\alpha_{NP}$ 植物プランクトンの窒素/りん	-
$k_{r20}$ 20 における植物プランクトンの呼吸速度定数	1/日
$a_{kr}$ 呼吸速度の温度依存係数	-
$k_{d20}$ 20 における植物プランクトンの枯死速度定数	1/日
$a_{kd}$ 枯死速度の温度依存係数	-
$\epsilon$ 植物プランクトンの分泌量/光合成量	-
$\gamma_{Co20}$ 20 における非生物態CODの分解速度定数	1/日
$a_{\gamma Co}$ CODの温度依存係数	-
$\gamma_{No20}$ 20 における非生物態有機態窒素の分解速度定数	1/日
$a_{\gamma No}$ 有機態窒素の温度依存係数	-
$\gamma_{Po20}$ 20 における非生物態有機態りんの分解速度定数	1/日
$a_{\gamma Po}$ 有機態りんの温度依存係数	-
$\gamma_{Ni20}$ 20 における脱窒速度定数	1/日
$a_{\gamma Ni}$ 脱窒速度定数の温度依存係数	-
$v_{plC}$ 植物プランクトンの沈降速度(藍藻)	m/日
$v_{plD}$ 植物プランクトンの沈降速度(珪藻)	m/日
$v_{plG}$ 植物プランクトンの沈降速度(緑藻)	m/日
$v_{Co}$ 非生物態CODの沈降速度	m/日
$v_{No}$ 非生物態有機態窒素の沈降速度	m/日
$v_{Po}$ 非生物態有機態りんの沈降速度	m/日
$v_{Pi}$ 無機態りんの沈降速度	m/日
$R_{Co20}$ 20 における非生物態CODの溶出速度	m/日
$a_{RCo}$ COD溶出速度の温度依存係数	-
$R_{Ni20}$ 20 における無機態窒素の溶出速度	m/日
$a_{RNi}$ 無機態窒素溶出速度の温度依存係数	-
$R_{Pi20}$ 20 における無機態りんの溶出速度	m/日
$a_{RPi}$ 無機態りん溶出速度の温度依存係数	-
$r_{Ni}$ T-N流入負荷量のうち無機態窒素の占める割合	-
$r_{Pi}$ T-P流入負荷量のうち無機態りんの占める割合	-

うにモデルパラメータの値を設定する。

### (1) 入力データ

計算に際して計算期間を通じた1日単位の入力データが必要となる。以下に入力データの入手、作成方法を述べる。

#### 1) 水温

対象期間を通じた水温の観測は行われていない。

このため、井の頭池における水温の測定値<sup>7)8)9)</sup>と東京(気象庁)の気温の関係について図-2のように一次回帰式を求め、この式に東京(気象庁)の日平均気温を入力し解析期間中の水温を推定した。

## 2) 日射量

対象期間において日射量の観測は行われていないため、東京(気象庁)における全天日射量を用いた。

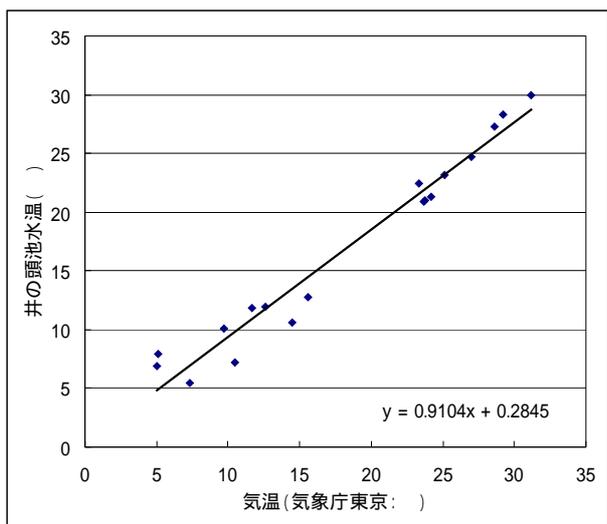


図-2 水温と気温の関係

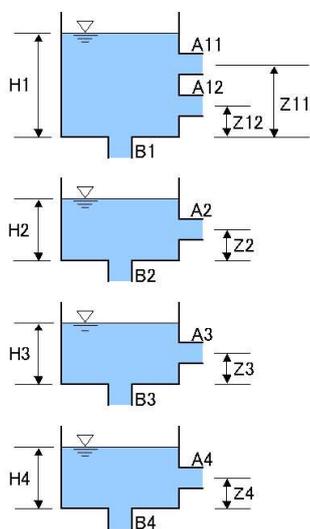


図-3 使用タンクモデル

表-2 月別日蒸発散量

月	日蒸発散量	月	日蒸発散量	月	日蒸発散量
1月	1.81 mm/day	5月	4.13 mm/day	9月	3.13 mm/day
2月	2.00 mm/day	6月	4.13 mm/day	10月	2.61 mm/day
3月	2.84 mm/day	7月	3.77 mm/day	11月	1.97 mm/day
4月	3.77 mm/day	8月	4.71 mm/day	12月	1.77 mm/day

## 3) 流出量

対象期間を通じた流出量の観測は行われていないが、1999年度と2000年度に流出量の観測調査<sup>10)11)</sup>が行われている。このデータをもとに図-3のタンクモデルを構築し、構築したタンクモデルを用いて対象期間の日流出量を推定した。タンクモデルによる流出量の推定に必要な降水量は東京(気象庁)の降水量を用い、蒸発量は近藤<sup>12)</sup>によるポテンシャル蒸発量をもとに表-2に示す月別日蒸発量を算出し、東京(気象庁)の日降水量が0mmであった場合は蒸発量を月別日蒸発量とし、日降水量が記録されていた場合は蒸発量を0とした。

## 4) 流入負荷量

井の頭池への流入負荷量は地下水からの導水によるもののみを考慮するものとし、地下水の水質調査結果<sup>9)</sup>を参考にCOD流入負荷量は0g/日、T-N流入負荷量は30,000g/日、T-P流入負荷量は100g/日に設定した。

## (2) モデルパラメータの値の設定と再現結果

シミュレーションモデルのパラメータの設定は印旛沼や手賀沼を対象に行われたシミュレーション<sup>5)6)</sup>を参考にして対象期間の水質の特徴を再現できるように表-3のように値を設定した。表-3に示したパラメータの値を用いて計算した井の頭池の水質変化を日降水量と共に図-4に示す。シミュレーションモデルによる計算値はクロロフィルaをやや過大に算出し、T-Nをやや過小に算出しているが、CODとT-Pは概観測値を再現できている。また、年間の水質の変動や大雨時にみられる水質の改善も表されている。

表-3 パラメータ設定値

パラメータ	設定値	パラメータ	設定値	パラメータ	設定値	パラメータ	設定値
$\mu_{\max C}$	3.0	$T_{optD}$	12.0	$a_{\gamma Co}$	0.076	$v_{No}$	0.63
$\mu_{\max D}$	1.16	$T_{optG}$	21.3	$\gamma_{No20}$	0.085	$v_{Po}$	0.61
$\mu_{\max N}$	0.9	$a_{CoC}$	46.6	$a_{\gamma No}$	0.084	$v_{Pi}$	0.25
$K_N$	0.08	$a_{CoN}$	8.2	$\gamma_{Po20}$	0.043	$R_{Co20}$	90.4
$K_{PC}$	0.041	$a_{NP}$	8.7	$a_{\gamma Po}$	0.073	$a_{RCo}$	0.080
$K_{PD}$	0.006	$k_{r20}$	0.033	$\gamma_{Ni20}$	0.135	$R_{Ni20}$	96.0
$K_{PG}$	0.033	$a_{kr}$	0.075	$a_{\gamma Ni}$	0.087	$a_{RNi}$	0.070
$I_{optC}$	8.2	$k_{d20}$	0.029	$v_{piC}$	0.080	$R_{Pi20}$	13.0
$I_{optD}$	3.9	$a_{kd}$	0.072	$v_{piD}$	0.02	$a_{Rpi}$	0.068
$I_{optG}$	5.8	$\epsilon$	0.08	$v_{piG}$	0.10	$r_{Ni}$	0.74
$T_{optC}$	32.7	$\gamma_{Co20}$	0.11	$v_{Co}$	0.84	$r_{Pi}$	0.60

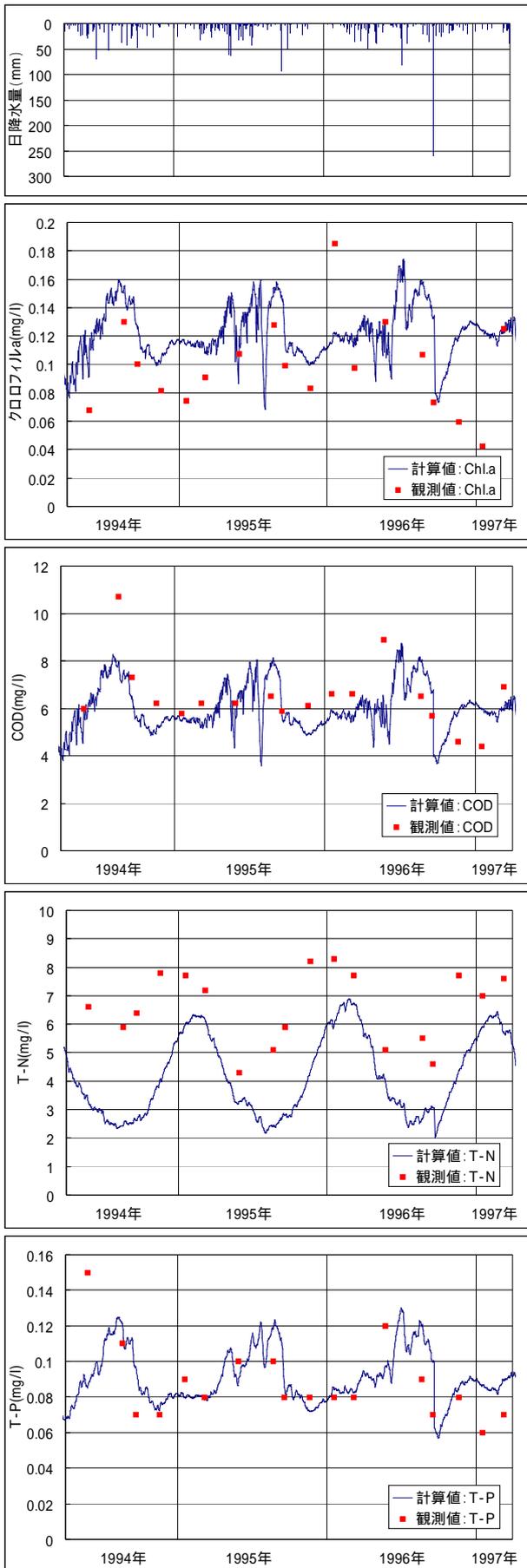


図 - 4 再現計算結果

## 5. 水質浄化による水質変化の推定

対象期間における水質調査結果<sup>7)8)9)</sup>をみると、1年を通じて透視度が20cm程度であり、透明度の改善が望まれる。透視度とCODの関係を図-5に示す。図において2つのデータが透視度が50cmにプロットされているが、いずれも透視度50cm以上のデータである。この図より透視度を改善するためにはCODを4mg/lより小さくすることが必要だと判断される。そこで、表-3に示したパラメータを用いて水質浄化を実施した際のCODの変化を推定する。

ここでは、汲み上げた地下水を水質浄化施設により窒素・りんを除去した後に池に導水する手法の効果を検討する。シミュレーションにおいては池への流入負荷量を修正して計算を行うことになる。流入負荷量を5割削減しT-N流入負荷量15,000g/日、T-P流入負荷量50g/日にする案A、流入負荷量を9割削減しT-N流入負荷量3,000g/日、T-P流入負荷量10g/日にする案Bについて、これらを実施した場合の池の水質変化を計算する。なお、ここで示した案はシミュレーションモデルの計算例を示すことを目的としており、実際に検討されているものではない。

図-6に2つの案を実施した場合のCODの変化を示す。流入負荷量を5割削減する案AによるCODの改善は0.5mg/l程度であり年間を通じてCODが4mg/lより大きいことから透視度が大きく向上することは期待できない。流入負荷量を9割削減する案BによるCODの改善は1mg/l程度であり、冬期にはCODが4mg/lを下回るようになり透視度の向上が期待される。水質浄化を行う場合、同じ手法であっても規模によって水質浄化の効果は大きく異なるので、水

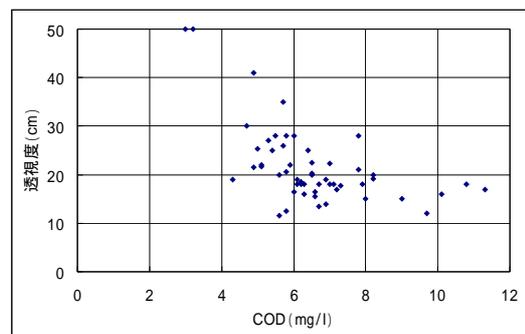


図 - 5 透視度とCODの関係

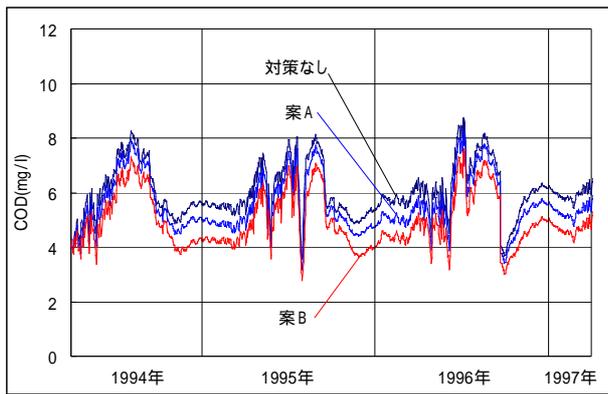


図 - 6 水質浄化による水質改善

質に変化が現れる規模の水質浄化を行うことが重要であり、水質シミュレーションを行うことで必要な規模を把握することができる。

## 6. まとめ

本報では水質改善を検討するツールとして水質シミュレーションモデルとその活用例を示した。井の頭公園の他にも池を有する都立公園は多く、こうした池に対してもパラメータの値については検討が必要なもののモデル自体は適用可能だと考えられる。

今回は、観測データのない項目、例えば、水温や流出量は他の調査結果等を利用して推定している。しかし、池の水質変化を適切に計算するためには年間を通じた水質データや池からの流出量等が把握されていることが必要である。池の現況把握に向けた水質や水収支に関する継続的な調査を実施し、これらの調査結果をもとに水質シミュレーションモデルを活用することで池の水質管理をより適切に行うことが可能になると考える。

## 参 考 文 献

- 1) 高遠達也(2007)：都立公園における池の維持用水としての地下水利用、水循環 貯留と浸透、社団法人雨水貯留浸透技術協会、23-29
- 2) 松梨史郎、井野場誠治、下垣久、宮永洋一(2002)：手賀沼における流動・水質・底質の時空間変動シミュレーションと底泥からの栄養塩溶出の水質への影響、土木学会論文集、No.712/II-60、161-173
- 3) 平間幸雄、小林節子(1999)：印旛沼・手賀沼の水質予測の試算(3)、平成10年度千葉県水質保全研究所年報、113-116
- 4) 片淵隆司、藤村和正、鴨下泰典(2008)：第35回土木学会関東支部技術研究発表会、11-035
- 5) 平間幸雄(2003)：印旛沼・手賀沼の水質シミュレーションモデルの改良、千葉県環境研究センター年報、第1巻、206-212
- 6) 平間幸雄(2006)：印旛沼の水質シミュレーションモデルの改良、千葉県環境研究センター年報、第4巻、110-111
- 7) 東京都西部公園緑地事務所(1995)：井の頭恩賜公園他2公園池水質調査委託報告書
- 8) 東京都西部公園緑地事務所(1996)：井の頭恩賜公園他2公園池水質調査委託報告書
- 9) 東京都西部公園緑地事務所(1997)：井の頭恩賜公園他2公園池水質調査委託報告書
- 10) 東京都西部公園緑地事務所(2000)：井の頭恩賜公園地下水実態調査委託報告書
- 11) 東京都西部公園緑地事務所(2001)：井の頭恩賜公園地下水実態調査委託報告書
- 12) 近藤純正(1997)：日本の水文気象(5) ポテンシャル蒸発量と気候湿潤度、水文・水資源学会誌、450-457