

# 多摩川中流域の水質変動を再現する数理モデルの開発 と計算機シミュレーションによる汚濁対策効果の検討

——数理モデルの開発と計算機シミュレーション  
による汚濁対策効果の検討——

1 9 7 8 年

合 葉 修 一  
東 京 大 学 教 授

# 目 次

1.	緒 言	
1-1	本研究の目的	1
1-2	数理シミュレーションの意義	1
2.	数理モデルの導出	
2-1	多摩川水質モデルの必要条件	1
2-2	変動機構	2
2-3	仮 定	3
2-4	数理モデル	5
3.	水質変動のシミュレーション	
3-1	野外調査	7
3-2	諸量諸係数値の決定	9
3-2-1	付着藻類	9
3-2-2	流量収支	13
3-2-3	係数値	14
3-3	収支計算に基づく未定係数値の決定	16
3-3-1	収支式	16
3-3-2	未定係数値の決定	19
3-4	計算の手順	21
3-5	結 果	22
3-5-1	実測値との比較	22
3-5-2	1日あたりの収支	24
4.	多摩川汚濁防止対策に関する2.3の検討	
4-1	検討の手順	26
4-2	予測シミュレーション	27
4-3	検 討	28
5.	結 言	

引用文献

# 1. 緒 言

## 1-1 本研究の目的

本研究の目的は、第1に多摩川中流域の特性を反映する水質変動モデルを導出し流域からの汚濁負荷量など入力进行操作して水質の変動を計算機シミュレーションにより予測することである。

第2には、これら予測結果に基づき多摩川中流域の汚濁対策につき考察することである。

## 1-2 数理シミュレーションの意義

近年河川水質の汚濁の進行に対処するため、水質の定期調査が数多く行われている。蓄積される定期調査結果は、これに続く解析手法が確立され適切な汚濁防止対策の選定の基礎に活用されてはじめて有意義である。

汚濁対策の検討には、

- 1) 流域からの汚濁負荷量の算定
- 2) 対象河川の自浄能力の推定、および
- 3) 両者のかねあいから、局所的負荷が下流に及ぼす影響を推算すること

が必要である。これらの課題は定期的調査結果の集約だけでは不十分であって、系内の汚濁物質の収支の算出とあわせて汚濁負荷に対する水質の応答を動的に再現しうることが必要である。

他方、流域の二次処理、三次処理施設の整備により期待される効果の推定など水質の将来予測に係る課題は実験が困難であるため大型計算機による数理実験の導入が必要である。

# 2. 数理モデルの導出

## 2-1 多摩川水質モデルの必要条件

1. 多摩川は水深が浅く流域からの栄養塩類の負荷が高いため河床の付着藻類の現存量は著しく高い(表2-1)。夏期、多摩川中流域で観測される溶存酸素濃度の顕著な日間変動はこれら藻類による日中の光合成と夜間の酸素消費に起因している。<sup>1)</sup> また、河床の付着藻類は不安定であって脱落により流水中へ有機汚濁物質を二次的に負荷する。水質モデルはまず、これら付着藻類の水質変動に及ぼす影響を定量化するものでなければならない。
2. 対象とする多摩川中流域は浅く川幅も狭い川幅のこう配が比較的大きい。上下および川幅方向の混合は十分であると考えられるから1次元の流れとして水質の変動を考慮すればよい。

前述のごとく、夏期溶存酸素濃度の極端な日間変動が観測されるから定常モデルないしは欧米の大規模河川にみる月単位の大まかな時間変動で取り扱うことは無意味である。<sup>2) 3)</sup>

表 2-1 多摩川における付着藻類の現存量(単位:クロロフィルa  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )

年月日	地点						
	1 羽村堰	2 拜島橋	3 日野橋	4 新井橋	5 関戸橋	6 多摩川 原橋	7 二子橋
昭和 47. 6. 14	1.9	6.1	10.4	11.2	20.3	10.8	9.6
47. 8. 18	4.4	22.2	32.5	77.5	23.4	50.5	22.2
47. 10. 25	4.3	8.1	10.0	13.0	12.2	8.1	21.2
47. 12. 8	3.2	9.0	27.0	25.3	44.5	26.2	29.0
48. 6. 10	3.7	—	13.0	12.1	7.8	—	12.3
48. 8. 14	7.3	20.5	23.3	28.2	48.4	33.2	36.1
49. 6. 9	4.2	21.1	32.0	15.4	12.4	17.8	15.2
49. 8. 11	15.6	17.8	40.4	19.4	50.9	43.9	40.4
49. 10. 20	0.9	22.1	36.4	15.1	10.9	36.7	16.5
50. 1. 19	2.2	4.1	10.0	22.6	12.9	18.9	17.2
50. 6. 15	4.1	4.0	12.4	9.9	9.1	7.2	9.0
50. 11. 5	2.5	60.1	102.0	11.2	87.5	104.0	7.3
51. 2. 11	13.5	11.7	18.8	45.2	33.9	35.2	23.8

したがって、日間変動に対応する時間項と1次元流れとしての距離項を考慮した数理モデルを導出する。

## 2-2 変動機構

### BOD :

流水中の有機物は細菌類により酸化分解されるが、一部は淵、川岸などの流れが停滞する水域に沈殿する。藻類の付着増殖は河床における有機物の生合成を意味し、脱落分解を通じて流水中への負荷となる。

### DO :

流水中の有機物の分解に伴い消費される。流水表面では再曝気により大気中との間に酸素が出入

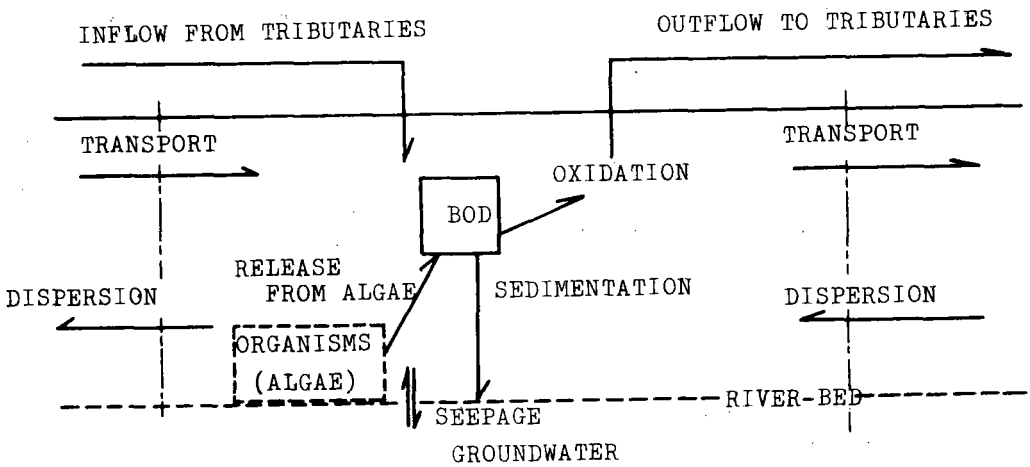
する。また、河床の付着藻類の光合成、呼吸により酸素が生成、消費される。

### PO<sub>4</sub>-P :

流水中の縮合態溶存リン酸は加水分解によりPO<sub>4</sub>-Pを生成する。流水中の懸濁物(SS)は脱落した生物フロックとシルトなど無機質な物質とから構成され、PO<sub>4</sub>-Pの摂取あるいは吸着に関与している。PO<sub>4</sub>-Pは河床における付着藻類の増殖に伴い摂取されるが、藻類の死滅分解を経てその一部は流水中へ再溶出する。

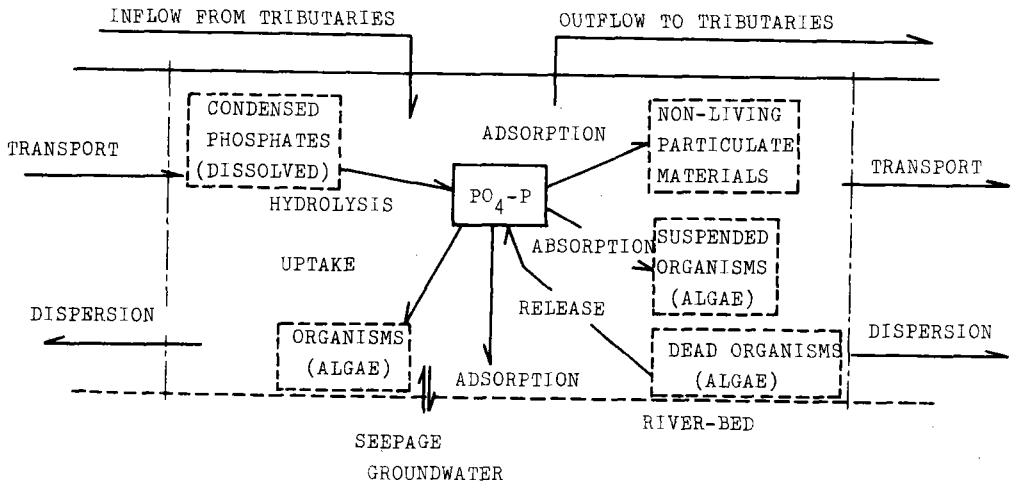
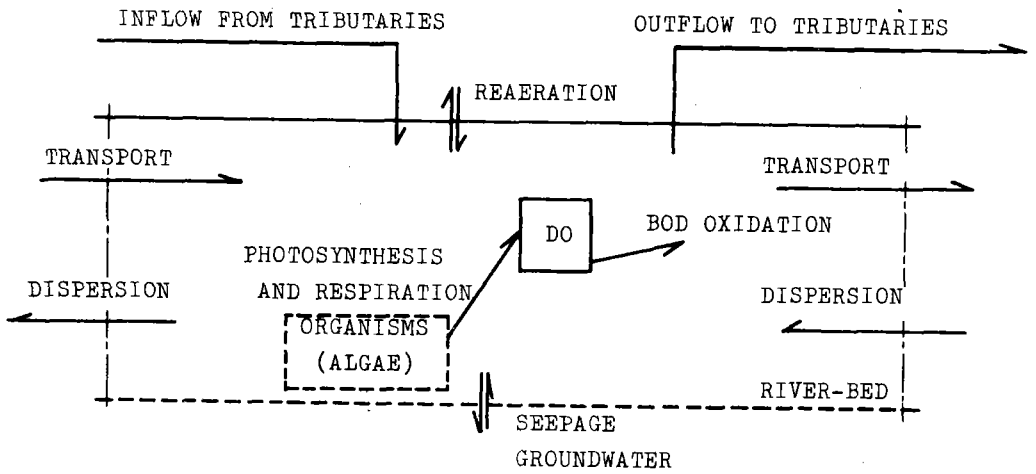
河床へのPO<sub>4</sub>-Pの固定には藻類以外の付着生物による摂取および物理化学的な沈澱吸着も考えられる。

以上の過程に河川水の流下による対流、濃度差に基づく拡散および伏流による出入の過程を加えて図2-1, 2-2および2-3を示す。



### 2-3 仮定

数理モデルの簡略化と導入される諸係数値の推定が可能となるよう以下の諸仮定を設定する。



1. 藻類の光合成速度  $P_G$  は、<sup>4)</sup>

$$P_G = \frac{I_B}{a + bI_B + cI_B^2} \quad \text{gO}_2 / \text{g クロロフィル 時} \quad (1)$$

ここに、

$I_B$  : 照度, lux  
 $a, b, c$  : 藻類種やその生理的条件により定まる定数

また、呼吸速度  $R_e$  は<sup>4)</sup> 溶存酸素に依存せず、

$$R_e = r \quad \text{gO}_2 / \text{g クロロフィル 時} \quad (2)$$

ここに、

$r$  : 藻類種やその生理的条件により定まる定数

とする。

2. 付着藻類の現存量は1日あたりの増殖量と脱落してBODの二次負荷となる減少量とがつりあって定常状態にあるとする。また、BODの二次負荷速度は1日を通じて一定と考える。
3. 縮合態の溶存リン酸の濃度は、 $\text{PO}_4 - \text{P}$  濃度に比例し加水分解は1次反応である。
4. 流水中の懸濁物による生物学的な摂取速度および物理化学的な吸着速度は一括してSSへの総括固定速度で表わされる。
5. 藻類による $\text{PO}_4 - \text{P}$  の固定量は藻類の増殖量に比例する。
6. 死滅藻類の分解による $\text{PO}_4 - \text{P}$  の再生産、藻類以外の付着生物による摂取および河床への物理化学的な固定はそれぞれの速度を実測することが困難であるから一括して河床への総括固定速度として表現する。

なお、細菌類による有機物の酸化分解およびそれともなう溶存酸素の消費、流水中の有機物の河床への沈降ならびに流水表面における再曝気の過程については、既往の研究報告にみる2), 3), 5) 定式をそのまま用いる。

## 2-4 数理モデル

BOD:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial AB}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( A \cdot D \cdot \frac{\partial B}{\partial x} \right) - \frac{\partial AUB}{\partial x} - k_1 BA \\
 (\text{蓄積}) & \quad (\text{拡散}) \quad (\text{対流}) \quad (\text{分解}) \\
 & - k_3 BA + k_4 MS + B_T - B_S \\
 & \quad (\text{沈降}) \quad (\text{藻類からの負荷}) \quad (\text{支流}) \quad (\text{伏流})
 \end{aligned} \tag{3}$$

DO :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial AC}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( A \cdot D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial AUC}{\partial x} - k_1 BA \\
 (\text{蓄積}) & \quad (\text{拡散}) \quad (\text{対流}) \quad (\text{BOD分解による消費}) \\
 & + k_2 (C_0 - C) A - rMS \\
 & \quad (\text{再曝気}) \quad (\text{呼吸}) \\
 & + \frac{I_B}{a + bI_B + cI_B^2} MS + C_T - C_S \\
 & \quad (\text{光合成}) \quad (\text{支流}) \quad (\text{伏流})
 \end{aligned} \tag{4}$$

PO<sub>4</sub>-P :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial AP}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial AUP}{\partial x} - k_5 \alpha PA \\
 (\text{蓄積}) & \quad (\text{拡散}) \quad (\text{対流}) \quad (\text{加水分解}) \\
 & - k_6 PWA - \mu M f_p S - k_7 PS \\
 & \quad (\text{SS吸着}) \quad (\text{藻類による固定}) \quad (\text{河床への固定}) \\
 & + P_T - P_S \\
 & \quad (\text{支流}) \quad (\text{伏流})
 \end{aligned} \tag{5}$$

ここに、

- A : 流路断面積, m<sup>2</sup>
- B : BOD 濃度, g BOD/m<sup>3</sup>
- B<sub>S</sub> : 伏流によるBOBの消失速度, g BOD/m時
- B<sub>T</sub> : 支流からのBODの負荷速度, g BOD/m時



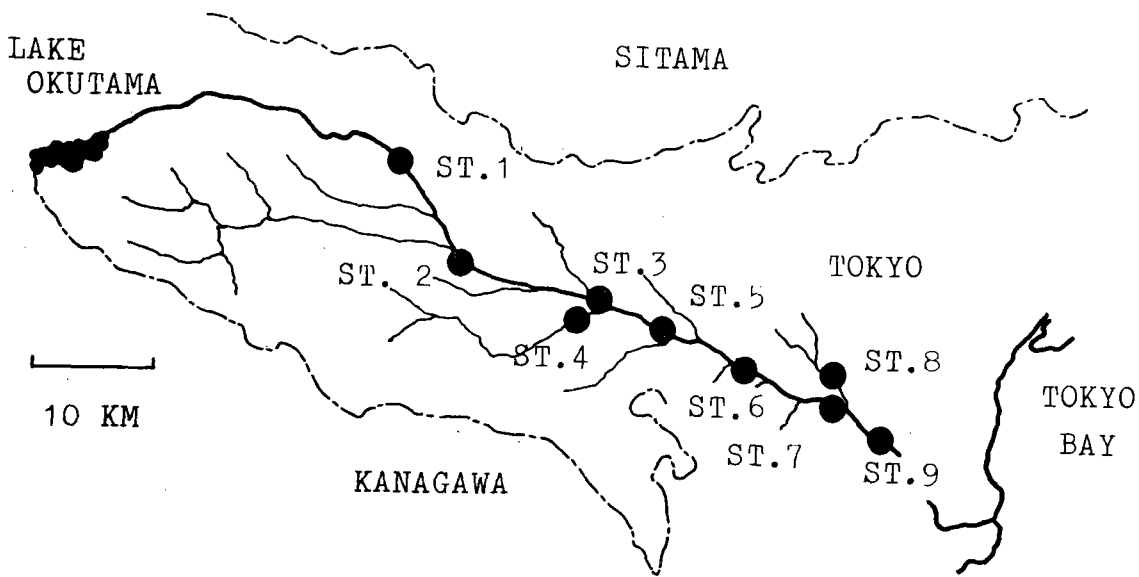
- $C$  : DO濃度 ,  $g O_2/m^3$   
 $C_{O_1}$  : 飽和DO濃度 ,  $g O_2/m^3$   
 $C_S$  : 伏流によるDOの消失速度,  $g O_2/m$ 時  
 $C_T$  : 支流からのDOの負荷速度,  $g O_2/m$ 時  
 $D_L$  : 拡散係数 ,  $m^2/時$   
 $f_P$  : 藻体のリン含有率,  $g P/g$  クロロフィル  
 $k_1$  : 細菌類によるBODの酸化分解反応速度係数,  $1/時$   
 $k_2$  : 再曝気速度係数,  $1/時$   
 $k_3$  : BODの沈降速度係数,  $1/時$   
 $k_4$  : BODの二次負荷速度係数,  $g BOD/g$  クロロフィル時  
 $k_5$  : 縮合態リンの加水分解速度係数,  $1/時$   
 $k_6$  : SSへの $PO_4-P$  総括固定速度係数,  $m^3/g SS$  時  
 $k_7$  : 河床への $PO_4-P$  総括固定速度係数,  $m/時$   
 $M$  : 付着藻類の現存量,  $g$  クロロフィル/ $m^2$   
 $P$  :  $PO_4-P$  濃度,  $g P/m^3$   
 $P_S$  : 伏流による $PO_4-P$ の消失速度,  $g P/m$  時  
 $P_T$  : 支流からの $PO_4-P$ の負荷速度,  $g P/m$  時  
 $S$  : 潤辺長,  $m$   
 $t$  : 時 間, 時  
 $U$  : 平均流速,  $m/時$   
 $W$  : SS 濃度,  $g SS/m^3$   
 $x$  : 流れ方向距離,  $m$   
 $\alpha$  : 縮合態溶存リン酸の算出係数  
 $\mu$  : 藻体の比増殖速度,  $1/時$

基礎式(3), (4)および(5)の解は<sup>1)</sup>差分法により求めることができる。

### 3. 水質変動のシミュレーション

#### 3-1 野 外 調 査

本研究のシミュレーションに用いた基礎データは、主に1972年8月の野外調査に基づいている。



調査地点(図3-1)は河口から約53km上流の羽村堰を起点として約40km下流の調布取水堰に至る区間に本流については11地点を選定した。また、根川、浅川、日野排水、大栗川、府中排水、三沢川、平瀬川および野川の各支流について本流との合流点付近の調査も行った。

調査は、車で同日中に上流から順に全地点を調査する方法と定点(日野橋付近=St.3)で24時間連続して測定する方法とを併用した。

表3-1および表3-2に夏期多摩川中流域の水質データの例を示す。

表 3-1 多 摩 川 水 質 (1972年8月18日)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	羽村堰	拝島橋	日野橋	新井橋	関戸橋	多摩川原橋	二子橋	野川	調布取水堰
採水時間	9:00	9:45	11:00	11:30	12:30	14:35	16:00	15:40	16:30
PH	8.0	7.8	8.8	8.0	9.0	9.2	8.4	7.8	9.1
水温 °C	17.0	24.6	27.0	27.2	28.2	29.2	29.1	28.3	29.2
SS mg/l	0.6	12.0	12.0	16.0	14.0	17.0	19.0	26.0	19.0
DO mg/l	10.2	11.2	13.2	13.5	14.3	16.4	15.0	7.9	9.1
PO <sub>4</sub> -P mg/l	0.01	0.13	0.27	0.29	0.21	0.31	0.27	1.24	0.41
BOD mg/l	0.9	3.2	3.8	6.8	5.0	5.8	5.2	14.5	8.8
NH <sub>4</sub> -N mg/l	0.08	0.44	1.32	2.35	1.54	1.19	1.20	7.38	1.73

表 3-2 多摩川水質 (1977年8月16日)\*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	羽村堰	拝島橋	日野橋	新井橋	関戸橋	多摩川 原橋	二子橋	野川	調布取 水堰
採水時間	10:30	11:05	11:40	12:00	13:40	14:05	14:50	14:40	15:15
PH	7.6	7.4	7.4	7.1	7.1	7.2	7.0	7.2	7.2
水温 °C	16.5	20.5	20.7	22.0	2.2	22.7	23.2	25.5	24.4
SS mg/l	1.5	21	19	26	20	21	19	16	24
DO mg/l	10.7	8.8	8.6	7.6	8.1	8.5	5.2	4.9	7.1
PO <sub>4</sub> -P mg/l	0.03	0.04	0.07	0.10	0.09	0.09	0.11	0.27	0.11
BOD mg/l	0.7	1.7	2.8	5.4	3.6	4.7	5.1	38.0	5.6
NH <sub>4</sub> -N mg/l	0.07	0.08	0.10	0.15	0.10	0.06	0.08	0.173	0.09

\* 1977年8月16日は、豪雨による増水時であったため河床の付着生物膜はほとんど脱落していた。また水量が多く栄養塩濃度は1972年8月18日(表3-1)に比べかなり小さい。したがって本論シミュレーションの基礎データとしては1972年8月18日の調査結果を採用している。

調査項目のうち、水温はJISB7411ガラス製棒状温度計、透視度は1mの透視度計を用いた。照度は離合社製水中照度計2501-A型を用い、PHは比色法により現場で測定した。

DOはJISK 0102-24.3 ウィンクラーアジ化ナトリウム変法<sup>6)</sup>により現場で固定し実験室に運んだ後分析した。また、同時に5~10°Cのアイスボックスに入れ持ち帰った試料水については、CODをJIS K0 102-13 過マンガン酸カリウム法<sup>6)</sup>、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N および PO<sub>4</sub>-P を JIS K0 102 の吸光光度法<sup>6)</sup>に準じて測定した。全リンはアメリカの標準法<sup>7)</sup>、BODは下水試験方法<sup>8)</sup>によりそれぞれ実験室で測定した。

### 3-2 諸量, 諸係数値の決定

#### 3-2-1 付着藻類

現存量: 各調査地点において、代表的な数個のレキを採取し刷毛を用い付着物をかき落した。これを適量の水を加えて100mlのポリビンに移し、同時にレキの寸法を測定して表面積を概算した。ポリビンに5~10°Cに保ったアイスボックスに入れ実験室に持ち帰り、その一部を超音波発生装置(TOMY UR 150P)を用いアセトン抽出し、クロロフィルa, bおよびcを比色法

により<sup>9)</sup>測定しその総和として付着藻類の現存量を求めた。

なお、同じ調査地点でも水深、流速などの相違により Synedra ulna をはじめとするケイ藻類が優占的な領域と緑藻の Stigeoclonium tenue が多量に発生している領域とがかなり明瞭に区別できた。実測した光合成、呼吸速度にも摂取領域により差異が認められたため、ここでは優占種の分布状態も考慮した。

すなわち、Stigeoclonium tenue と Synedra ulna とをそれぞれ付着藻類の優占種とする代表的なれきを採取しそれぞれのクロロフィル量を測定した。日野橋から調布取水堰までの全地域の付着藻類の分布関数は、これら測定値を折れ線近似し決定した。

光合成、呼吸速度の実測：河床のレキからはぎ落した藻類をBOD測定用ガラスビンに移し、明びん、暗びん法<sup>4)</sup>により日野橋 (St. 3) および二子橋 (St. 7) の両地点で実測した。

測定は Stigeoclonium tenue を優占種とする付着藻と Synedra ulna を優占種とするものとの二つのグループにつきそれぞれ行った。

暗びんにおけるDO変化量(理論値)は、

$$V \frac{dC}{dt} = r M' \quad (6)$$

ここに、

- V : 酸素びんの容積, ml
- C : 時刻 t における DO 濃度, mg O<sub>2</sub>/ml
- r : 呼吸速度, mg O<sub>2</sub>/mg クロロフィル時
- M' : 藻体量, mg クロロフィル

式(6)から、

$$C = C_0 + \frac{M'}{V} r (t - t_0) \quad (7)$$

ここに、

- C<sub>0</sub> : 時刻 t<sub>0</sub> における DO 濃度, mg O<sub>2</sub>/ml

実測値と理論値の比較から最小自乗法により r を決定した。

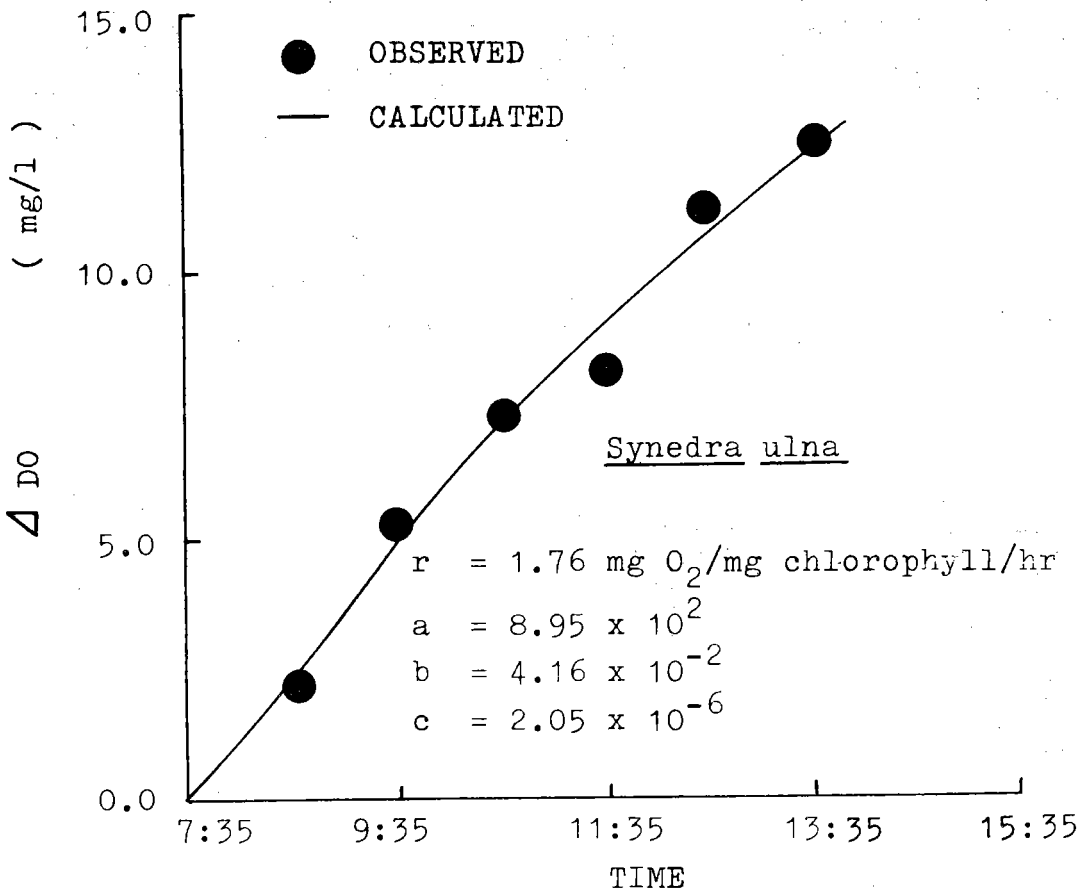
この呼吸速度 r を用いた明びんにおける DO の変化量は、

$$V \frac{dC}{dt} = \frac{I_B}{a + bI_B + cI_B^2} M' + rM' \quad (8)$$

積分して、

$$C = C_0 + \left\{ M' \int_{t_0}^t \frac{I_B}{a + bI_B + cI_B^2} dt + M'r(t - t_0) \right\} \frac{1}{V}$$

呼吸速度  $r$  の決定同様 理論値と実測値の比較から  $a$ ,  $b$  および  $c$  を決定した。この計算では、修正したコンプレックス法の汎用プログラムを用いた。結果の1例を図3-2に示す。



最終的にシミュレーションに用いた値は、

Synedra ulna を優占種とする場合、

$$a = 8.95 \times 10^2, \quad b = -4.16 \times 10^{-2}, \quad c = 2.05 \times 10^{-6}$$
$$r = 1.76 \text{ mg O}_2 / \text{mg クロロフィル 時}$$

Stigeoclonium tenue を優占種とする場合、

$$a = 7.33 \times 10^3, \quad b = -6.94 \times 10^{-1}, \quad c = 3.40 \times 10^{-5}$$
$$r = 0.87 \text{ mg O}_2 / \text{mg クロロフィル 時}$$

である。

なお、光合成速度の算出に必要な河床照度は以下の方法で推定した。

Lambert - Beer の法則から、

$$I_B(t) = I_0(t) e^{-\lambda l} \quad (10)$$

ここに、

$I_B(t)$  : 時刻  $t$  における河床照度, lux

$I_0(t)$  : 時刻  $t$  における表面照度, lux

$\lambda$  : 減衰係数,  $1/m$

$l$  : 水面から河床までの光路長,  $m$

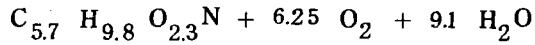
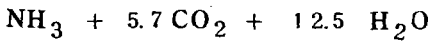
$I_0$  は日野橋 (St. 3) における毎時間の測定値を補間し任意の時刻  $t$  における表面照度  $I_0$  を算出した。 $\lambda$  は表面照度  $I_0$ , 河川照度  $I_B$  及び水深  $l$  の実測値から式 (10) を用いて逆算した。 $\lambda$  はその水域の透視度  $T_T$  に依存するが、各調査地点での  $T_T$  の実測値と算出した  $\lambda$  の比較から、

$$\lambda = 0.66 / T_T \quad (11)$$

であった。

比増殖速度 : 式 (9) を用いた  $t_0 = 0 \sim t = 24$  時までの単位藻体量 ( $M' = 1 \text{ mg}$  クロロ

フィル)あたりの溶存酸素生成積算量をもとに次の光合成の量論式から藻体増殖量に換算した。<sup>11)</sup>

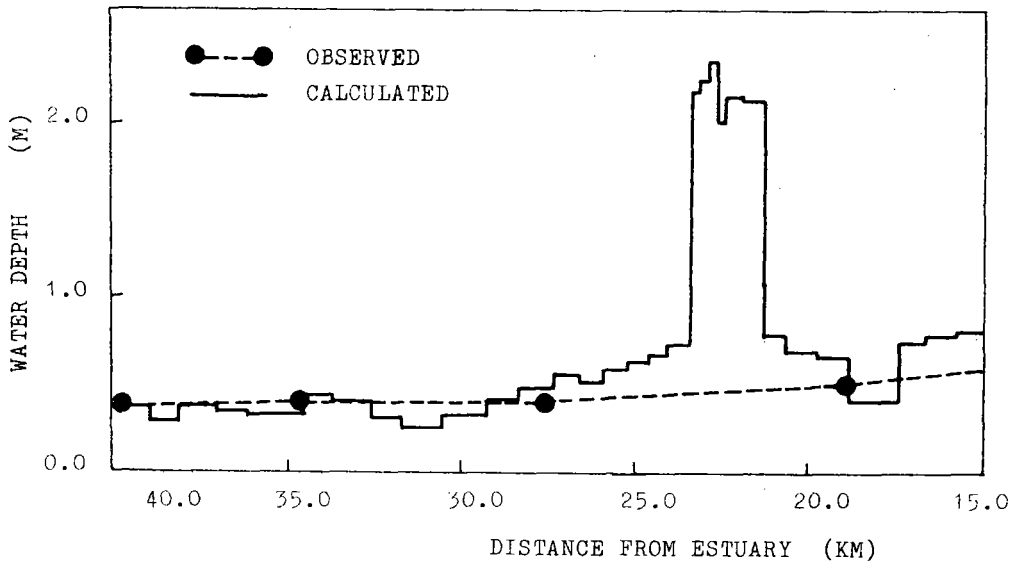


リン含有率: 実測値から  $f_p = 2.40 \text{ P/g}$  クロロフィル

### 3-2-2 流量収支

流量収支は本流起点の流量に支流の流量を加算して求められるはずである。しかしながら多摩川中流域はかなりの伏流量が存在するためこの加算流量をそのまま用いると従属変量にとった水深が実際とかけはなれてしまう。<sup>12)</sup>

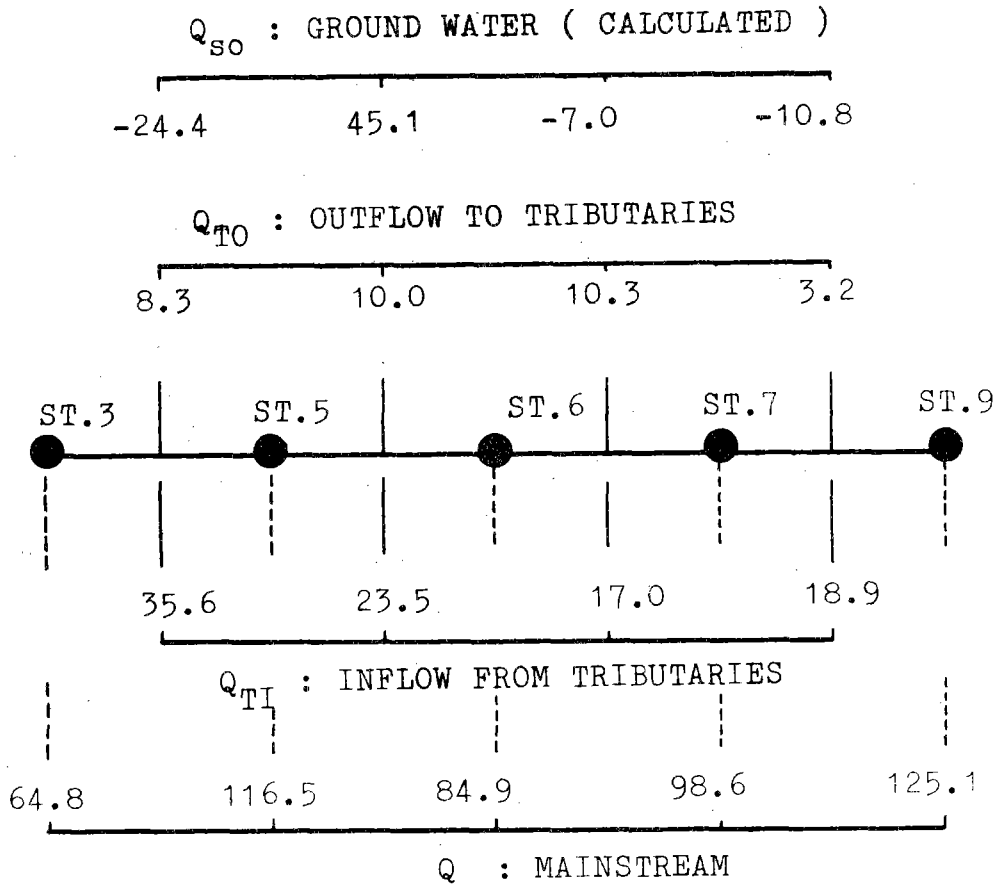
図3-3は、1972年8月の多摩川中流域における加算流量から流速および潤辺長の実測値を



用いて算出した水深(計算値)を実測水深と比較した結果である。図から明らかなように、河口から18~28 km付近で伏流量を無視して算出した水深は実測値から顕著に隔っている。

したがって、シミュレーションの基礎となる流量収支においては可能なかぎり水深、潤辺長および流速の実測値を採用してこれらの実測値から算出される流量と上記の加算流量との差を伏流量として仮定して流量収支を求めた。

伏流量の算出値を含めて1972年8月の流量収支を図3-4に示す。



UNIT =  $10^3 M^3/DAY$

なお、伏流水中に含まれる着目物質の濃度は実測が困難であるから、当該水域の本流水中の濃度に等しいと仮定しておく。

### 3-2-3 係数值

拡散係数  $D_L$  :

Thackson らの推算式から,<sup>13)</sup>

$$D_L = 1.64 \times 10^3 h u_* \left( \frac{u}{u_*} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

$$U_* = (h S_e g)^{\frac{1}{2}}$$



ここに、

$u$  : 平均流速,  $m/時$

$u_*$  : 摩擦速度,  $m/時$

$g$  : 重力の加速度,  $m/時^2$

$S_e$  : エネルギー勾配

$h$  : 水深,  $m$

BODの酸化分解反応速度係数  $k_1$  : 温度依存性を考慮して<sup>14)</sup>

$$k_1 = 0.23 \times 1.042^{(T-20)} \quad (13)$$

ここに、

$T$  : 水温,  $^{\circ}C$

なお、水温はSt. 3 において測定した日間変動の実測値を採用する。

BODの二次負荷速度係数  $k_4$  : 前述した1日あたりの比増殖速度(=mg 藻体/mg クロロフィル 日)に藻体のBODへの換算係数  $f_{BOD} = 0.41 \text{ mg BOD/mg 藻体}$  (実測値)を乗じたのち、1時間あたりの速度係数に換算するため24で割り求めた。

縮合態溶存リン酸の加水分解速度係数  $k_5$  :

Shannon らの実験結果<sup>15)</sup>を参照して、

$$k_5 = 1.430 \times 10^{-2}, \quad 1/時$$

また、縮合態溶存リン酸の算出係数  $\alpha$ は、

$$\alpha = \frac{P_{Tf} - P}{P} \quad (14)$$

ここに、

$P_{Tf}$  : ミリポアフィルター(孔径1.2ミクロン)により濾過した河川水の総リン量,  
 $gP/m^3$

で定義され、測定した結果

$$\alpha = 0.125 \quad \text{であった。}$$

SSへの総括固定速度係数  $k_6$  :

実測結果から,

$$k_6 = 6.02 \times 10^{-7}, \text{ m}^3/\text{g SS 時}$$

再曝気速度係数  $k_2$ , BODの沈降速度係数  $k_3$  および河床への  $\text{PO}_4\text{-P}$  の総括固定速度係数  $k_7$  は次節に述べる収支計算に基づき算定した。

### 3-3 収支計算に基づく未定係数値の決定

#### 3-3-1 収支式

基礎式(3), (4)および(5)において1日あたりの定常状態を仮定すれば,

BOD :

$$A_B D_{LB} \frac{\bar{B}_B - \frac{\bar{B}_A + \bar{B}_B}{2}}{\frac{1}{2} \Delta x} \cdot 24 - A_A D_{LA} \frac{\frac{\bar{B}_A + \bar{B}_B}{2} - \bar{B}_A}{\frac{1}{2} \Delta x} \cdot 24$$

(下流側拡散 :  $B_1$ )

(上流側拡散 :  $B_2$ )

$$- A_B U_B \bar{B}_B \cdot 24 + A_A U_A \bar{B}_A \cdot 24$$

(下流側境界からの流出 :  $B_3$ )

(上流側境界からの流入 :  $B_4$ )

$$- k_1 \frac{\bar{B}_A + \bar{B}_B}{2} \cdot \frac{A_A + A_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24$$

(酸化分解による消失 :  $B_5$ )

$$- k_3 \frac{\bar{B}_A + \bar{B}_B}{2} \cdot \frac{A_A + A_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24$$

(沈降による消失 :  $B_6$ )

$$+ k_4 \bar{M} \frac{S_A + S_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24$$

(藻類によるBODの二次負荷 :  $B_7$ )

$$+ Q_I \cdot \bar{B}_T$$

(支流からの流入 :  $B_8$ )

$$- Q_0 \frac{\bar{B}_A + \bar{B}_B}{2}$$

(支流への流出 :  $B_9$  )

$$- Q_s \frac{\bar{B}_A + \bar{B}_B}{2}$$

(伏流への流出 :  $B_{10}$  )

$$= 0 \quad (15)$$

DO :

$$A_B D_{LB} \frac{\bar{C}_B - \frac{\bar{C}_A + \bar{C}_B}{2}}{\frac{1}{2} \Delta x} \cdot 24 - A_A D_{LA} \frac{\frac{\bar{C}_A + \bar{C}_B}{2} - \bar{C}_A}{\frac{1}{2} \Delta x} \cdot 24$$

(下流側拡散 :  $D_1$  )                      (上流側拡散 :  $D_2$  )

$$- A_B U_B \bar{C}_B \cdot 24 + A_A U_A \bar{C}_A \cdot 24$$

(下流側流出 :  $D_3$  )                      (上流側流出 :  $D_4$  )

$$- k_1 \cdot \frac{\bar{B}_A + \bar{B}_B}{2} \cdot \frac{A_A + A_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24$$

(BODの酸化分解にともなう消失 :  $D_5$  )

$$+ \overline{\text{TPN M}} \frac{S_A + S_B}{2} \cdot \Delta x$$

(光合成による生成 :  $D_6$  )

$$+ k_2 \left( C_0 - \frac{\bar{C}_A + \bar{C}_B}{2} \right) \cdot \frac{A_A + A_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24$$

(再曝気による溶入 :  $D_7$  )

$$+ Q_I \bar{C}_T$$

(支流からの流入 :  $D_8$  )

$$- Q_0 \frac{\bar{C}_A + \bar{C}_B}{2}$$

(支流への流出 :  $D_9$  )

$$\begin{aligned}
 & - Q_s \frac{\bar{C}_A + \bar{C}_B}{2} \\
 & \quad \text{(伏流への流出 : } D_{10} \text{)} \\
 & = 0 \qquad \qquad \qquad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{PO}_4 \text{-P :} \\
 & A_B D_{LB} \frac{\bar{P}_B - \frac{\bar{P}_A + \bar{P}_B}{2}}{\frac{1}{2} \Delta x} \cdot 24 - A_A D_{LA} \frac{\frac{\bar{P}_A + \bar{P}_B}{2} - \bar{P}_A}{\frac{1}{2} \Delta x} \cdot 24 \\
 & \quad \text{(下流側拡散 : } P_1 \text{)} \qquad \qquad \text{(上流側拡散 : } P_2 \text{)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - A_B U_B \bar{P}_B \cdot 24 \qquad \qquad + A_A U_A \bar{P}_A \cdot 24 \\
 & \quad \text{(下流側流出 : } P_3 \text{)} \qquad \qquad \text{(上流側流入 : } P_4 \text{)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + k_5 \frac{\bar{P}_A + \bar{P}_B}{2} \frac{A_A + A_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24 \\
 & \quad \text{(縮合態溶存リン酸の加水分解 : } P_5 \text{)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - k_6 \frac{\bar{P}_A + \bar{P}_B}{2} \cdot \frac{W_A + W_B}{2} \frac{A_A + A_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24 \\
 & \quad \text{(SSへの固定 : } P_6 \text{)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \bar{\mu} \bar{M} f_p \frac{S_A + S_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24 \\
 & \quad \text{(藻類による摂取 : } P_7 \text{)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - k_7 \frac{\bar{P}_A + \bar{P}_B}{2} \frac{S_A + S_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24 \\
 & \quad \text{(河床への固定 : } P_8 \text{)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + Q_I \bar{P} \\
 & \quad \text{(支流からの流入 : } P_9 \text{)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - Q_o \frac{\bar{P}_A + \bar{P}_B}{2} \\
 & \quad \text{(支流への流出 : } P_{10} \text{)}
 \end{aligned}$$

$$- Q_s \frac{\bar{P}_A + \bar{P}_B}{2}$$

(伏流への流出 :  $P_{11}$ )

$$= 0$$

(17)

ここに,

$\bar{B}$  : 区間境界におけるBOD平均濃度,  $g \text{ BOD}/m^3$

$\bar{BT}$  : 支流の平均BOD濃度,  $g \text{ BOD}/m^3$

$\bar{C}$  : 区間境界におけるDO平均濃度,  $g \text{ O}_2/m^3$

$\bar{CT}$  : 支流の平均DO濃度,  $g \text{ O}_2/m^3$

$\bar{M}$  : 区間内の付着藻類の平均現存量,  $g \text{ クロロフィル}/m^2$

$\bar{P}$  : 区間境界における $\text{PO}_4\text{-P}$ 平均濃度,  $g \text{ P}/m^3$

$\bar{PT}$  : 支流の平均 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度,  $g \text{ P}/m^3$

$Q_I$  : 流入する支流流量,  $m^3/\text{日}$

$Q_o$  : 流出する支流流量,  $m^3/\text{日}$

$Q_s$  : 伏流への流出流量,  $m^3/\text{日}$

TPN : 単位藻体量あたりの1日の酸素生成積算量の区間平均値,  $g \text{ O}_2/g \text{ クロロフィル 日}$

$\Delta x$  : 区間の長さ,  $m$

$\mu$  : 藻類の平均比増殖速度,  $1/\text{時}$

添 字

A : 上流側境界における値

B : 下流側境界における値

(15), (16)および(17)式から以下の3区間ごとに1日あたりの収支を計算した。

第1区間 : 日野橋(河口から40 km) ~ 関戸橋(34.5 km)

第2区間 : 関戸橋(34.5 km) ~ 多摩川原橋(28 km)

第3区間 : 多摩川原橋(28 km) ~ 二子橋(18 km)

### 3-3-2 未定係数値の決定

再曝気による溶入量 $D_7$ は,

$$-D_7 = D_1 - D_2 - D_3 + D_4 - D_5 + D_6 + D_8 - D_9 - D_{10}$$

BODの沈降量は,

$$B_6 = B_1 - B_2 - B_3 + B_4 - B_5 + B_7 + B_8 - B_9 - B_{10} \quad (19)$$

PO<sub>4</sub>-Pの河床への固定量は,

$$P_8 = P_1 - P_2 - P_3 + P_4 + P_5 - P_6 - P_7 + P_9 - P_{10} - P_{11} \quad (20)$$

(18), (19)および(20)式の右辺各項は, 前述した3区間につきそれぞれ計算される。

再曝気速度係数  $k_2$  は,

$$k_2 = \frac{-D_7}{\left(C_0 - \frac{\bar{C}_A + \bar{C}_B}{2}\right) \cdot \frac{A_A + A_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24} \quad (21)$$

BODの沈降速度係数  $k_3$  は,

$$k_3 = \frac{B_6}{\frac{\bar{B}_A + \bar{B}_B}{2} \cdot \frac{A_A + A_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24} \quad (22)$$

PO<sub>4</sub>-Pの河床への総括固定速度係数  $k_7$  は,

$$k_7 = \frac{P_8}{\frac{\bar{P}_A + \bar{P}_B}{2} \cdot \frac{S_A + S_B}{2} \cdot \Delta x \cdot 24} \quad (23)$$

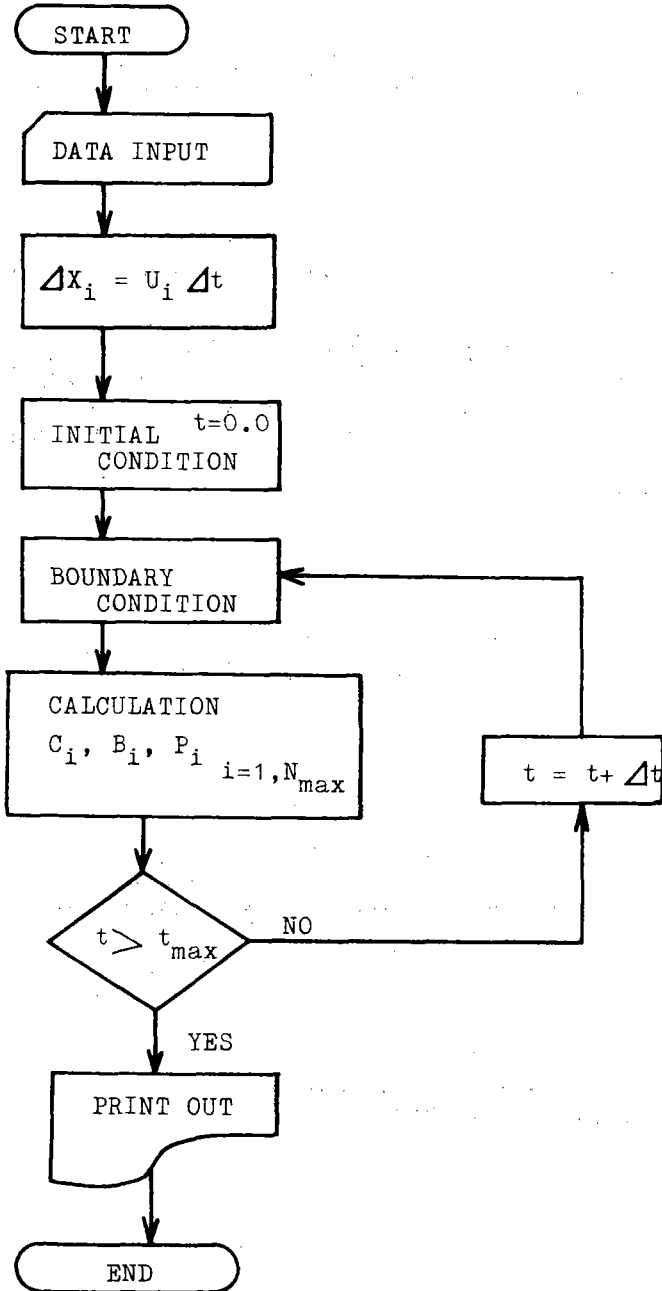
で計算される。表3-2に  $k_2$ ,  $k_3$  および  $k_7$  の算出結果を示す。

表 3-3  $k_2$ ,  $k_3$  および  $k_7$  (計算値)

区 間	$k_2$	$k_3$	$k_7$
	1/hr	1/hr	m/hr
1. 日野橋 ~ 関戸橋	0.19	0.080	0.035
2. 関戸橋 ~ 多摩川原橋	0.43	0.092	0.045
3. 多摩川原橋 ~ 二子橋	0.29	0.028	0.011

### 3-4 計算の手順

計算のフローチャートを図3-5に示す。



データの入力後，差分近似誤差（擬拡散<sup>1)</sup>）を防止するための不等区間分割を次式に従い実行する。

$$\Delta x_i = U_i \Delta t \quad (24)$$

ここに，

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= \text{区間長さ} \quad , \quad m \\ U_i &= \text{流速} \quad , \quad m/\text{時} \\ \Delta t &= \text{時間刻み幅} \quad , \quad \text{時} \end{aligned}$$

時間の刻み幅  $\Delta t$  は，計算の精度と繰り返し計算による計算時間の増加とを念頭において，

$$\Delta t = 0.5 \quad \text{時間}$$

とした。この結果，日野橋～二子橋間に関し

$$\text{区間数 } N = 34$$

$$\text{区間の長さ } \Delta x = 200 \sim 1300 \text{ m}$$

であった。

境界条件は，日野橋における実測値（1972年8月18日）を採用し，初期条件には，St. 3, 5, 6および7における時刻0:00の実測値（1972年8月21日）を用いた。

なお，使用した計算機は東京大学大型計算機センター HITAC（8700/8800）である。

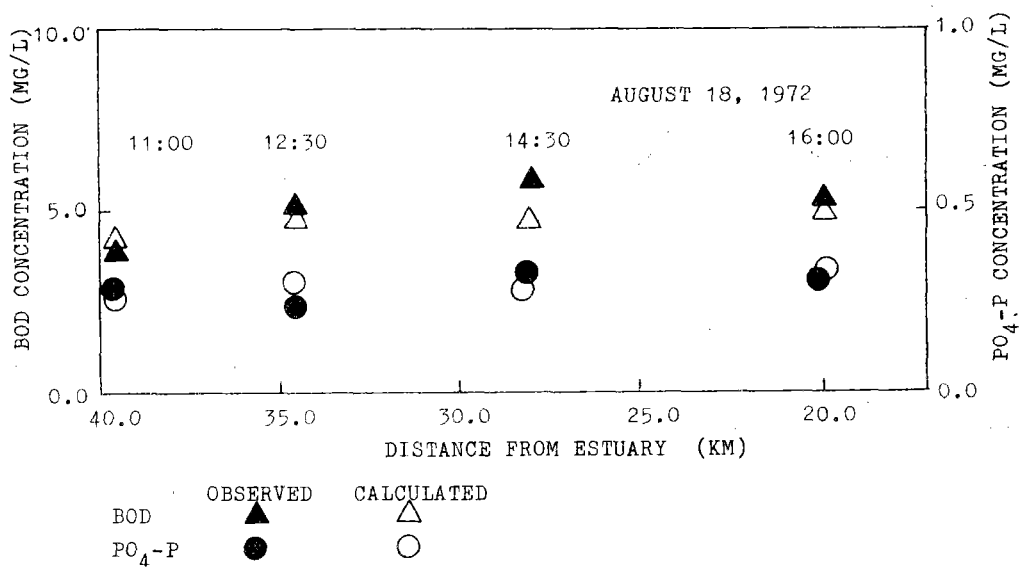
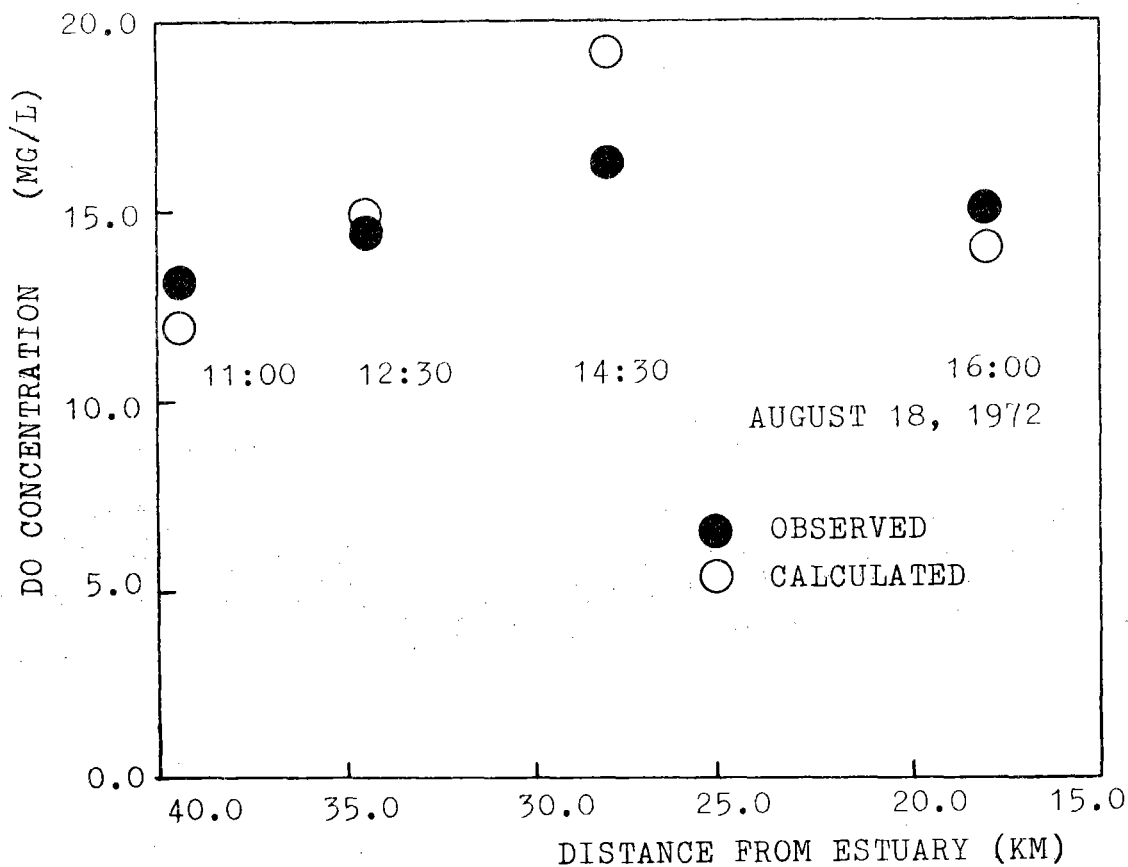
### 3-5 結 果

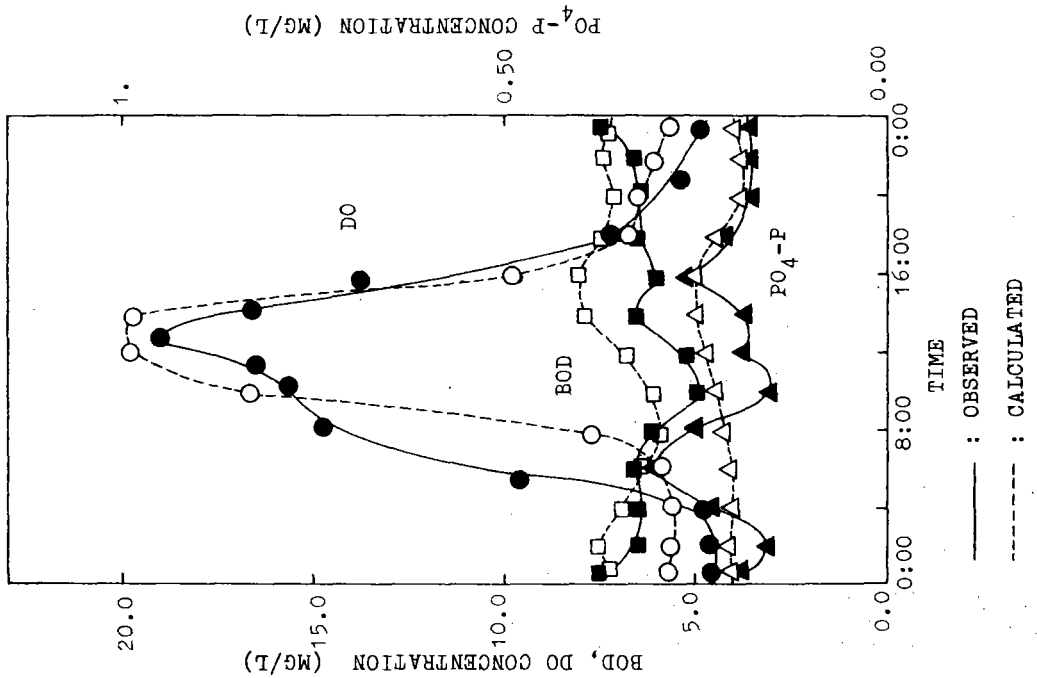
#### 3-5-1 実測値との比較

1972年8月18日の多摩川中流域における実測値と計算値との比較を図3-6および3-7に示す。実測値は位置とともに採水時間が異なるためシミュレーションの結果も位置とともに当該の時刻の結果を採用した。日間変動の著しいDOにおいても相対誤差 =  $|\text{実測値} - \text{計算値}| / \text{実測値}$  は最大17%（28km地点，14:30）であり位置および時刻の二次元的な比較であることを考慮するならば満足しうる結果である。

図3-8は関戸橋付近におけるDO, BOD および  $\text{PO}_4\text{-P}$  の日間変動の実測値（1972年8月21日）と計算値を比較した結果である。DO濃度の顕著な変動は，付着藻類の存在を考慮してはじめて再現できたものである。

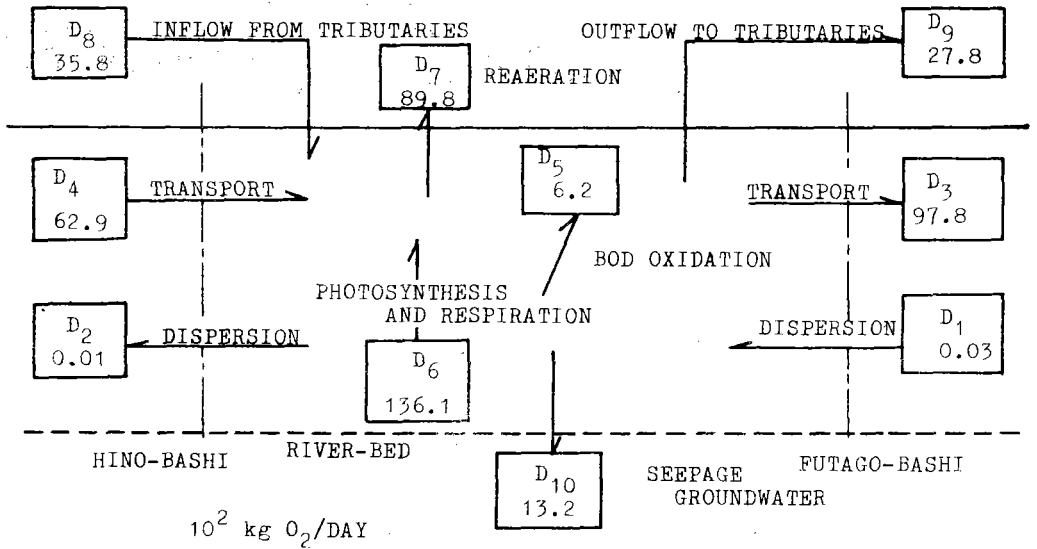


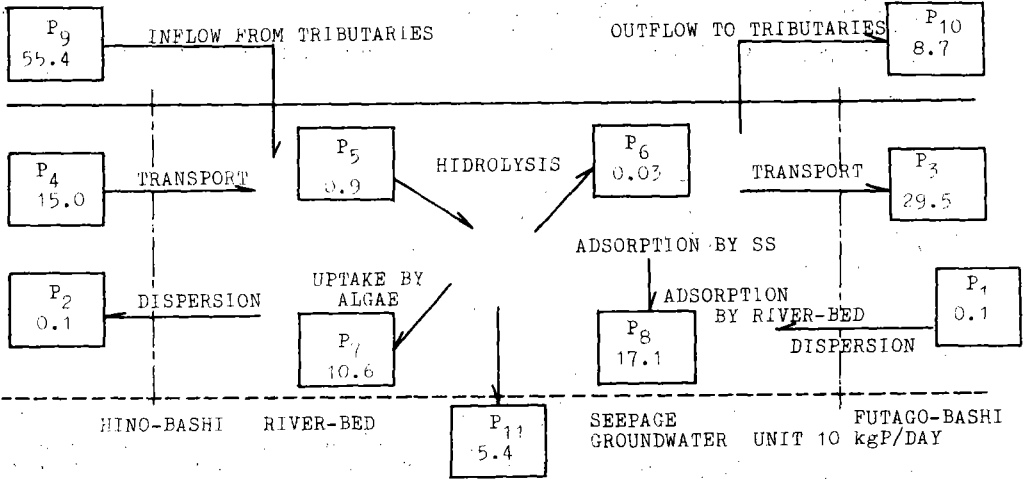
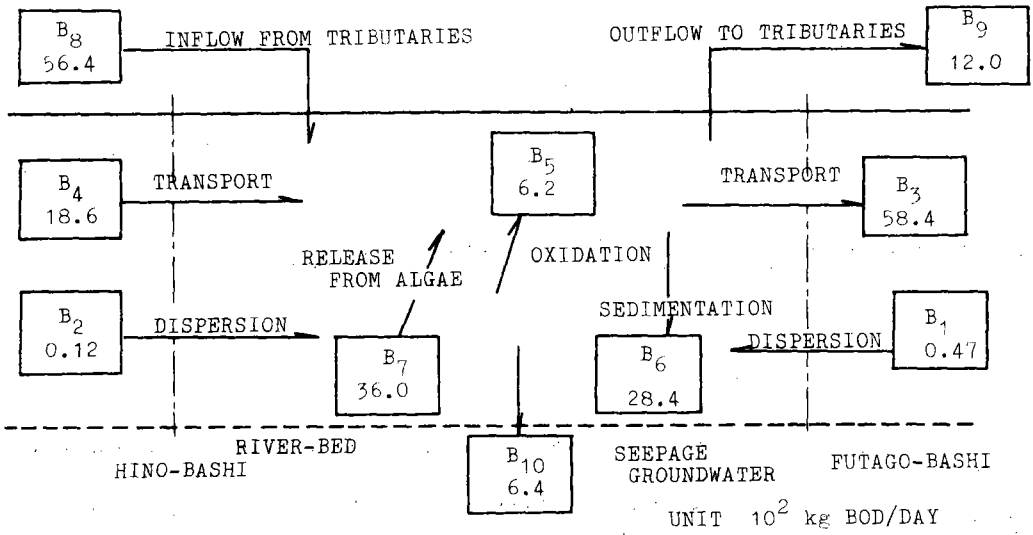




3-5-2 1日あたりの収支

多摩川日野橋~二子橋間の BOD, DO および  $PO_4 - P$  の1日あたりの収支を図3-9, 3-10 および3-11 にそれぞれ示す。





DOは藻類による生成(光合成量から呼吸量を差し引いたもの)が  $136.1 \times 10^2$  kgO<sub>2</sub>/日であり, 日中の DO 濃度が飽和値  $C_0 = 7.06$  (30℃) ~  $8.41$  (20℃) gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> の 200% にも達する主因をなしている。このため流水表面では大気中への酸素の逃散が行われている ( $D_1 = 89.8 \times 10^2$  kgO<sub>2</sub>/日)。

BOD は日野橋上流および支流から流入する量  $B_4 + B_8 = 7,500$  kg BOD/日 に対して二子橋下流および支流へ流出する量  $B_3 + B_9 = 7,040$  kg BOD/日はほぼ等しい。藻類による BOD の二次負荷量  $B_7$  は全負荷量  $B_4 + B_7 + B_8 = 10,100$  kg BOD/日の約 35% に相当している。これに対して拡散  $B_1, B_2$  および酸化分解による消失量  $B_5$  はむしろ小さい。

$PO_4-P$  は流入量  $P_4 + P_9 = 704 \text{ kg P/日}$  に対して、流出量  $P_3 + P_{10} = 382 \text{ kg P/日}$  で約 54% に相当している。藻類による固定  $P_7 = 106 \text{ kg P/日}$  は流入量の約 15% に当るが拡散  $P_1, P_2$ , 縮合態溶存リン酸の加水分解による生成量  $P_5$  および SS への固定量  $P_6$  は比較的小さい。なお藻類の分解実験の結果から、取りこまれたリン量の約 66% は比較的早期に溶出することも判明している。<sup>(6)</sup>

また算出された多摩川日野橋～二子橋間の 1 次生産量は  $16.7 \text{ g O}_2/\text{m}^2/\text{日}$  である。

#### 4. 多摩川汚濁防止対策に関する 2.3 の検討

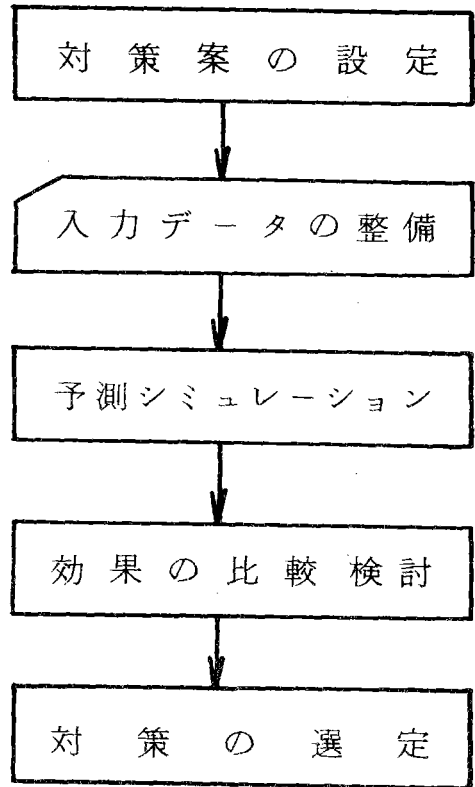
水質汚濁対策の計画立案にあたっては、個々の対策の効果を予測推定し選定の基礎とすることが必要である。ここでは汚濁対策効果の予測シミュレーションを実行し対策効果につき考察する。

##### 4-1 検討の手順

検討の手順を図 4-1 に示す。検討する対策案として都市下水の 2 次処理, 3 次処理施設の整備に加えて、流量、水深および潤辺長などの河川構造の改良も想定する。また、河川そのものに覆蓋を施すことも検討に加えておく。

これは、流量の増減が汚濁負荷に対する希釈効果と関連し、水深が河床の照度を規定して自浄作用に重要な意味を有する付着生物相の構成に顕著に影響すると考えられるからである。さらに河床面積の増減は汚濁物質の河床への吸着や河床の付着生物による汚濁物質の摂取など流水-河床間の相互作用と密接に関連している。

入力データとしては、1972 年現状のシミュレーション(前章)に採用した諸量、諸係数値を原則として用いる。予測シミュレーションの実行においては、2 次処理および 3 次処理の効果を BOD および  $PO_4-P$  の流入負荷量の削減として処理する。水深および潤辺長の増減の影響は、流量  $Q(x) = H(x) \cdot S(x) \cdot U(x)$  一定の条件下で  $H(x)$  または  $S(x)$  を変



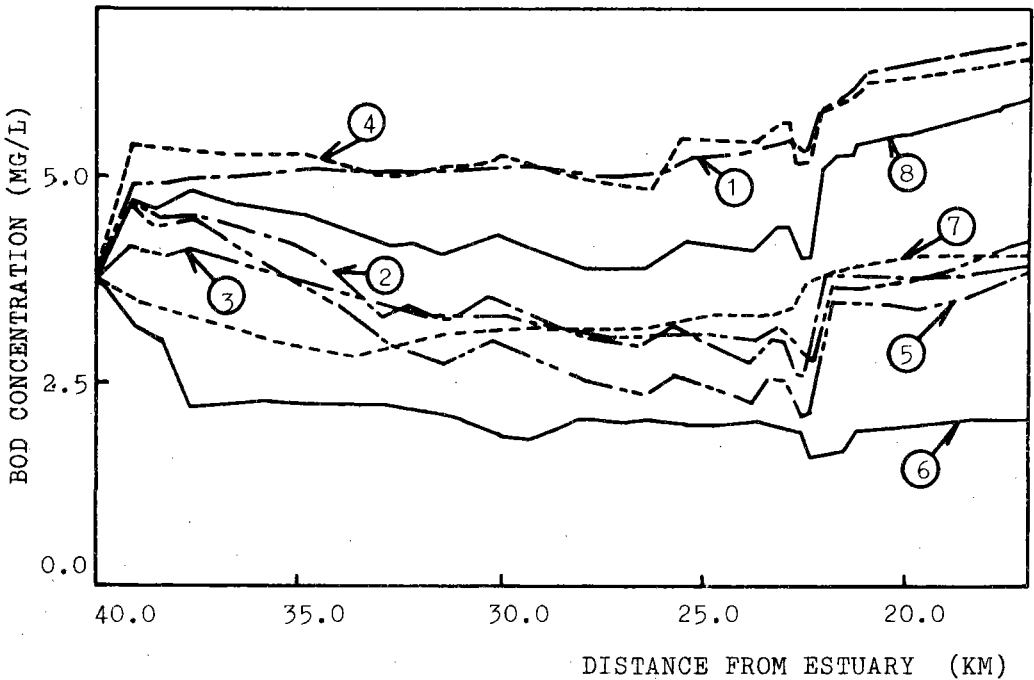
動させて検討する。さらに、流量の影響は流速 $U(x)$ を時間的に一定として $A(x) = H(x) \cdot S(x)$ を変動させ、覆蓋の影響は付着藻類の現存量 $M(x) \rightarrow 0$ として検討する。

#### 4-2 予測シミュレーション

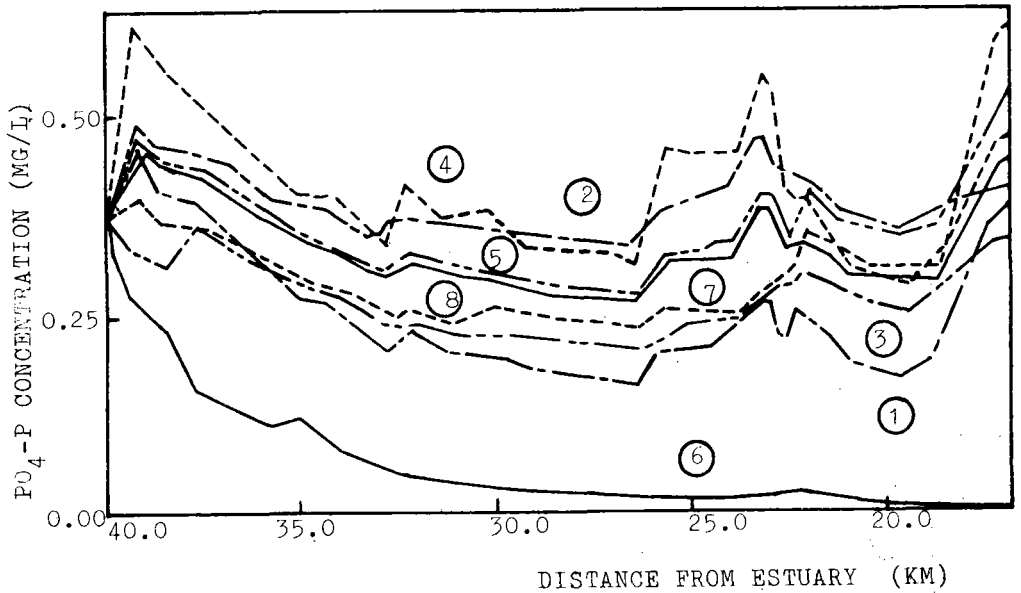
以下の7項目に関して予測シミュレーションを行った。

1. 水深が現状(1972年8月を基準として)の $\frac{1}{2}$ 、潤辺長が2倍に浅く広くなった場合、
2. 水深が2倍、潤辺長が $\frac{1}{2}$ に深く狭くなった場合、
3. 流水量が2倍に増加した場合、
4. 流水量が $\frac{1}{2}$ に減少した場合、
5. 河川表面に覆蓋した場合、
6. 支流からの汚濁負荷を全面的に削除した場合、
7. 支流からの流入水をすべて2次処理水に置換した場合、すなわち流入水質が2次処理水質にまで改善された場合。

予測シミュレーション結果を図4-2、および4-3に示した。



図中番号1~7は上述の項目番号に対応し番号⑧の曲線は、現状(1972年8月)の濃度分布を示している。



#### 4-3 検 討

図4-2および4-3に示した結果を総括すれば、

1. 浅く広くなると(曲線①) PO<sub>4</sub>-Pの除去は増大するが同時にBODの二次汚濁を促進して有機汚濁は現状よりも進行する。
2. 深く狭くなると(曲線②)二次負荷の減少により有機汚濁はいくぶん改善されるが PO<sub>4</sub>-Pの自浄効果は減少する。流水の水質に及ぼす河床の影響はかなり減少すると言える。
3. 本流の流量の増大は(曲線③) PO<sub>4</sub>-P およびBOD濃度のいずれも低下させる。すなわち水量が低下した河川の流水量を回復させることは水質改善に直結すると言えよう。
4. 本流流量のさらなる減少は(曲線④) PO<sub>4</sub>-P およびBOD濃度をそれぞれ現状より高め、自浄効果は減退する。前述の結果とあわせ、流水量の確保が多摩川中流域の水質管理の上できわめて重要であることは明らかである。
5. 河床の付着藻類の影響を除去するため仮りに全域にわたり覆蓋した場合(曲線⑤) BODは2次負荷=0であるからかなりの濃度の低下をみる。PO<sub>4</sub>-P濃度は藻類による除去が期待できないため現状よりいくぶん増大する。多摩川の付着藻類の現存量は水質浄化の観点からして過多であり、BODの2次汚濁の効果が浄化効果を凌駕していると言える。
6. 支流からのBODおよび PO<sub>4</sub>-P 負荷を完全に削除した場合(曲線⑥) PO<sub>4</sub>-P濃度は著しく低下する。BODは残存する PO<sub>4</sub>-P を利用した藻類の二次負荷が消失しないため著しい濃度低下はみられない。しかしながら低い PO<sub>4</sub>-P濃度が制限となって現状の藻類付着量

を維持することが困難となり、次第にBODの二次負荷量も減少すると考えられる。

7. 支流からの流入水がすべて二次処理水で置換された場合(曲線⑦)現状に比しBODおよび $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度のいずれもやや改善される。なお、ここに用いた二次処理水質は、多摩川流域下水処理場のひとつで実測した値、 $\text{BOD} = 3.0 \text{ g/m}^3$ ,  $\text{PO}_4\text{-P} = 0.70 \text{ g/m}^3$ である。

## 5. 結 言

本研究において、

1. 多摩川中流域の特性を反映する水質変動モデルを導出した。
2. 野外調査により得られた基礎データを用い数理シミュレーションを実行して水質変動が充分再現できることを確めた。
3. 1日あたりの多摩川中流域の収支計算を行い、付着藻類の水質変動への寄与の程度を見積るとともにみかけの自浄能力の推定を行った。
4. 汚濁負荷量、流水量、河川構造等のパラメータを変動させ汚濁対策の効果を比較検討した。
5. この結果から、多摩川中流域の水質改善には、やはり流域からの負荷を削減することが最も有効である。また、流水量の少ない多摩川においては、適切な流水量の確保が緊要であり、逆に河川構造の改変や覆蓋をすることは必ずしも有効とは考えられない。

今後の水質管理にあたっては、定期的水質調査とモデル解析とを統合し相互に補いつつ対策を検討して行く必要がある。

## 引 用 文 献

- 1) 合葉ら(1975) 下水道協会誌, 12, №131, 33
- 2) G. D. Pence, et al. (1968) Jour. San. Eng. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engr., 94, 381-402
- 3) D. J. ÓConnor, et al. (1968) Jour. San. Eng. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engr., 94, 1225-1250
- 4) 陸水生物生産測定方法論研究会編(1969)  
陸水生物生産研究法, 講談社
- 5) H. W. Streeter and E. B. Phelps (1925) Public Health Bulletin, No. 146, 75
- 6) 日本工業標準調査会(1972) 工業排水試験方法 K 0102
- 7) APHA, AWWA, WPCF (1960) Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, 11 ed.
- 8) 日本下水道協会(1974) 下水試験方法
- 9) J. D. H. Strickland and T. R. Parsons (1965) Fish. Res. Bd. Canada Bull., 125
- 10) M. Okabe et al. (1973) Jour. Ferment. Technol., 51, 594-605
- 11) 合葉ら(1975) 下水道協会誌, 12, No. 132, 26
- 12) S. Aiba and H. Ohtake (1977) Water Research, 11, No. 2, 159
- 13) E. L. Thackston and P. A. Krenkel (1967) Jour. San. Eng. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engr., 93, 67-90
- 14) P. A. Krenkel, E. L. Thackston (1969) Jour. San. Eng. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engr., 95, No. SA1, 37
- 15) J. E. Shannon and G. F. Lee (1966) Int. Jour. Air. Wat. Pollut., 10, 735-756
- 16) R. Sudo et al., (1978) Water Research,