

最近の日本における水質汚濁研究上の 2, 3の課題について

岩 井 重 久

Some Problems on the Water Pollution Research in Recent Japan

Shigehisa Iwai

Synopsis—In this paper, (1) an estimation method is developed, in the light of Streeter-Phelps-Thomas Equations and with a practical example, so as to evaluate the future reformation of BOD (Biochemical Oxygen Demand) and DO (Dissolved Oxygen) of stream water which will receive effluent from a nightsoil treatment plant or a sewage treatment plant. Furthermore, (2),-(a) new problems are proposed to the sources of water supply in downstream reaches of a stream, with the actual example of the River Yodo, when sewage works up to the secondary treatment have been developed in the upstream area of the stream. Also, -(b) a new simulation process is developed for the eutrophication of lake water. Upon applying the process to the Lake Biwa water, a good fitness is recognized between observed data and computed results. Finally, -(c) an advanced treatment process is required for the removal of nitrogen in organic wastewaters, in order to solve the problems proposed in -(a) and to prevent the eutrophication stated in -(b). A new advanced treatment process which was invented and named FDA (Facultative Denitro-Aeration) Process by the present author's group is stated and discussed. The result of application of this process to the nightsoil treatment plant at the City of Hikone is introduced, revealing that a potable effluent has been continuously obtained from the plant for the recent three years, with a slight rise of operation cost.

概 要

わが国での水質汚濁に関して問題となっているのは；(1)下・廃水処理の効用についての認識が各人によって異なるために、その規模や処理の程度、緊急度についての意見が分れ、住民の反対運動も生じやすいが、これは公共水域での自浄・蓄積の両作用に関する認識が浅く、その評価や危惧の程度が異なるために、極めて観念的な論争が行なわれるのみで、被害の実相を究明し、それ以前の蓄積・自浄の作用の実態を科学的に解明するという努力に欠けていたこと、また(2)

地域的には人口集中や産業開発が大いに進み、従来からの汚濁対策のみでは対処しえなくなったこと。すなわち、下水道の発達も遅れ走せながら促進されているが、これはまた新しい汚濁問題を提起することとなり、さらに閉鎖水域では従来からの下・廃水処理では対処しえないような排水中の栄養塩類等による富栄養化問題が生じているので、新処理技術の開発が緊急必要事となっていること、などである。

そこで本論では、まず(1)諸水質項目中でBOD(生化学的酸素要求量)とDO(溶存酸素)とを採り上げ、モデルとしての河川とその沿岸流域における人口分布とを仮定し、この流域からの排水が、無処理、し尿処理施設を設ける、下水処理場を設けるの3ケースについての当該放流先河川でのBOD₅の変化とDOの収支とに関して、Streeter-Phelps-Thomasの式を適用した結果を論述した。ついで(2)琵琶湖・淀川水系を例とし、(a)京都市などの上流域の下水処理が進歩したために生じた、大阪市などの水道原水としての中・下流部の淀川水質に関する諸問題、(b)琵琶湖水質の富栄養化の実態調査やシミュレーションに関する研究の成果と、筆者が責任者として定めることとなった滋賀県条例による琵琶湖関連の水質基準の設定の経緯とを述べ、最後に、(c)そのために筆者等が開発し、すでに彦根市のし尿処理施設で、費用をかけずに飲用適の放流水を3年間も出し続けているという、FDA(通性脱窒曝気)法について紹介することとする。

なお、本論文は、筆者が昭和55年7月3日に米国のテキサス大学(オースチン)大学院環境工学科において行なった特別講義の内容に少しく追加したものであり、また近く国際的に改めて発表する予定のものであることを付記する。

1. し尿・下水処理施設による放流先河川水質の改善効果

a. あるモデル河川でのBODとDOとの縦断分布の推測

図-1の上図に示すようなある河川のA点の下流の両岸に人家や農地があり、そこから等分布負荷量(l_0 単位はkg/km)として、し尿やその他の汚水に由来するBOD₅負荷が、DOが飽和した状態で一様に流入するとする。A点より上流の河川水のBOD₅負荷量を L_a (kg/d)とし、河川流速 U (km/d)は一定であり、A点から測った河水の流下時間を t (d)とする。実際には河川流路の状況や、 l_0 を運んで両岸から流入する水量増加を考えても U は一定ではありえないが、河川の流積が漸増するために、その変動は小さく、一定値をとると仮定する。

A点より t (d)だけ流下した任意地点のBOD₅, L とDO不足量, $D(=Q(C_s - C) \geq 0)$, [ここにその地点での河川流量を Q , DO濃度を C , DO飽和濃度を C_s とする], とはStreeter-Phelps-Thomas法に従って、それぞれ(1), 式(2)のように表わされる¹⁾。式(2)はDOの垂下曲線(たるみ曲線)を示す。

$$L = L_1 + L_2$$

$$= L_a \exp\{-K_1 + K_3\}t + \frac{l_0 U}{K_1 + K_3} \{1 - \exp\{-(K_1 + K_3)t\}\} \dots\dots\dots(1)$$

$$D = \frac{K_1}{K_2 - K_1 - K_3} \{ \exp\{-K_1 + K_3\}t - \exp(-K_2 t) \} \left(L_a - \frac{l_0 U}{K_1 + K_3} \right)$$

$$+\frac{K_1 l_0 U}{K_2(K_1+K_3)}\{1-\exp(-K_2 t)\}+D_a \exp(-K_2 t) \dots\dots\dots(2)$$

ここに D_a はA点における D , K_1 , K_3 , K_2 はそれぞれ好氣的, 嫌氣的の脱酸素定数, および再曝気定数(一般に K は e を底とする値で, 10を底とする場合は $k=0.4343K$ となる)。

式(1)中で, L_1 は, L_a から出発する脱酸素(1次)反応速度を示す式(1)'を解くことにより求められ, L_2 は, $l_0 U$ から出発し, 式(1)'と全く同様に成立する式(1)''から求めた $l_0 U$ を, $0 \rightarrow t$ で定積分することによって求まる。

$$\frac{dL_1}{dt} = -(K_1+K_3)L_1, \quad (t=0, L_1=L_a) \dots\dots\dots(1)'$$

$$\frac{dl_0 U}{dt} = -(K_1+K_3)l_0 U, \quad (t=0 \text{ で } l_0 U) \dots\dots\dots(1)''$$

つぎに式(2)は, 式(1)'中の K_3 を0(L_1 は不変)とした L_1 の反応速度, 同様に式(2)'中の K_3 を0として求めた L_2 の反応速度(L_2 は不変), および D についての再曝気(1次)

反応速度の3者を, 正負の符号を考慮して合成した D についての反応速度式[すなわち (dD/dt) の微分方程式]を解いて求まる。

簡易化のために $K_3=0$ とし,

$$f=K_2/K_1, \quad x=\exp(-K_1 t) \dots\dots\dots(3)$$

と表わして式(1), 式(2)を書き改めると,

$$L=L_a x+l_0 U(1-x)/K_1 \dots\dots\dots(1-1)$$

$$D=(x-x^f)(L_a-l_0 U/K_1)/(f-1)+l_0 U(1-x^f)/(fK_1)+D_a x^f \dots\dots\dots(2-1)$$

さらに $K_2=K_1$, $\therefore f=1$ ならば,

$$D=K_1 t x(L_a-l_0 U/K_1)+l_0 U(1-x)/K_1+D_a x \dots\dots\dots(2-1)'$$

ここで, $L_a=0$, $D_a=0$ ならば,

$$L=l_0 U(1-x)/K_1 \dots\dots\dots(1-2)$$

$$D=l_0 U\{1-x(1+K_1 t)\}/K_1 \dots\dots\dots(2-2)$$

式(2-1), 式(2-1)', 式(2-2)のいずれにおいても, $D \leq QC_s$ の条件が付く。ゆえに D の限界(最大)値は $D_c=QC_s$ となり, $D=QC_s$ となる区間では常に $D_c=QC_s$ となる。もし l_0 あるいは L_i が最下流負荷となる場合は, さらにその下流において D_c が生じ, これから D が漸減し

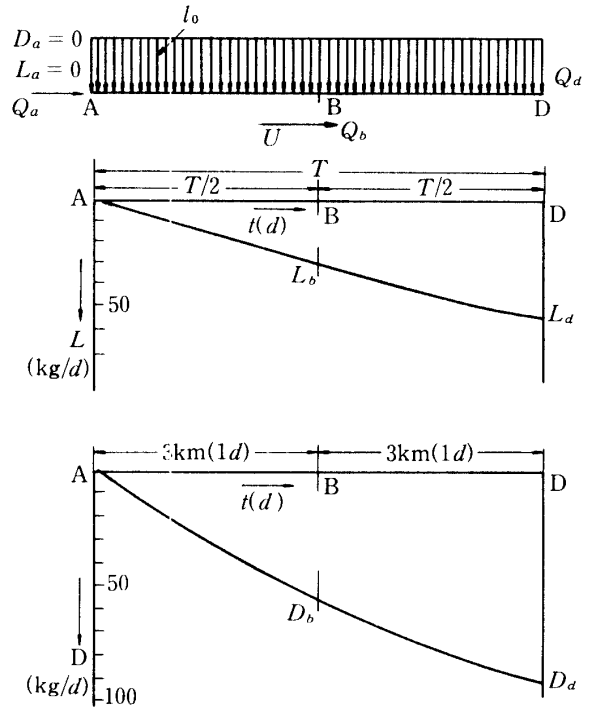


図-1 処理場のない場合のBOD₅量(L)とDO不足量(D)との河川流下にとまなう変化(例)

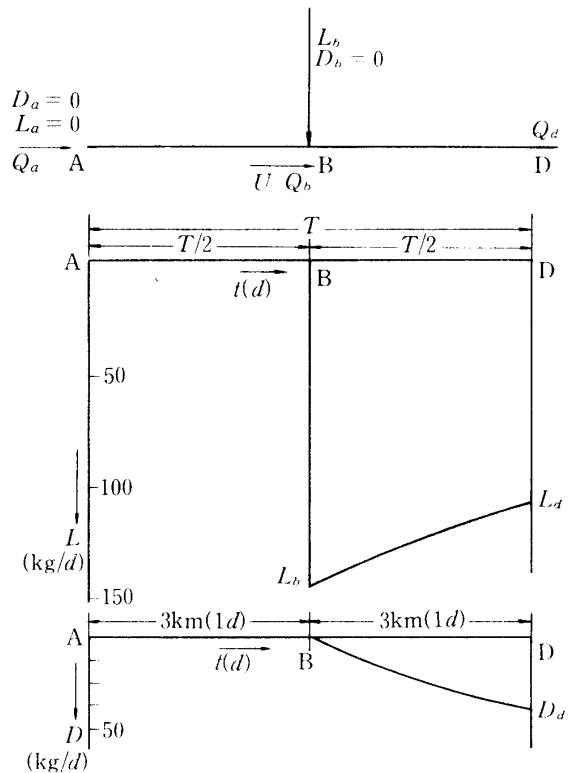
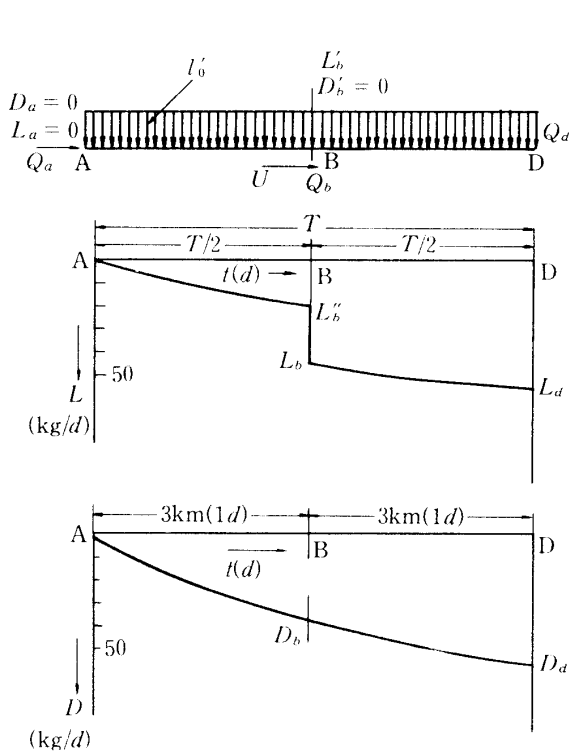


図-2 B地点にし尿処理場を設けた場合のBOD₅量(L)とDO不足量(D)との河川流下に伴う変化(例)

図-3 B地点に下水処理場を設けた場合のBOD₅量(L)とDO不足量(D)との河川流下に伴う変化(例)

て0に近づいていく場合がある。

b. 計算例

図-1の上図のように、A点から $T=2(d)$ だけ流下した $TU=6\text{ km}$ 下流の点をDとし、AD間の両岸流域は、巾15kmずつでこの河川に平行な帯状であり、その単位面積当りの人口密度も200人/ km^2 と一定であるとする、し尿や汚水によるBOD₅負荷量 l_0 は図示のように等分布となる。

一方、図-2の上図に示すように、AD間流域のし尿を収集し、その処理場をAD間の中点B ($t=T/2$) に設け、 L_b' および $D_b' = 0$ の処理水を当該河川に放流するとする。この場合し尿由来以外のBOD₅は l_0' (kg/km) の等分布負荷量として残り、また L_b' は次式から算出できる。すなわち、収集原し尿量は1.2(l/人/d)、そのBOD₅濃度は13,500(mg/l)であるから、負荷量は16.2(g/人/d)。これを20倍の清水(BOD₅を含まない)で希釈した後で、30(mg/l)以下のBOD₅濃度で放流するのであるから、

$$L_b' = 0.72 \times 10^{-3} P(\text{kg/d}) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 P はAD間両岸流域内人口(人)。

図-1の場合、し尿や汚水、すなわち下水の排出量は200(l/人/d)、そのBOD₅濃度は243(mg/l)、ゆえにその負荷量は48.6(g/人/d)とするが、これは図-2の場合の収集原し尿の負荷量の丁度3倍にあたる。図-1、図-2の場合とも、汚水はすべて両岸流域内における自浄作用により、河川流達時には原負荷量の40%にまで減っている(流達率はすべて0.4)とする。この60%の減量中

には、強雨の初期だけに流出するような流域内での蓄積量も含まれていることに注意を要する。この流達率を用いると、図-1において、 $l_0 = 0.4 \times 48.6 \times 200 (\text{g/km}) = 116.64 (\text{kg/km})$ 、ゆえに、図-2における l'_0 は $(2/3)l_0 = 77.76 (\text{kg/km})$ となる。また式(4)により $L'_b = 0.72 \times 10^{-3} \times 36,000 = 25.92 (\text{kg/d})$ 。

図-3は、B点に下水処理場（分流式で2次処理まで）を設けた場合（B点の両岸に対称的に設ける場合もある）を示し、この場合の処理場からの放流水のBOD₅濃度は20(mg/l)以下とするために、図中の L_b は $20 \times 200 \times 36000 (\text{mg/d}) = 144 (\text{kg/d})$ となる。またすべての場合の処理後放流水のDOは飽和しているとする。

河川の固有流量 Q （低水量で考える）は、A点において $Q_a = 43,200 (\text{m}^3/\text{d}) [= 0.5 \text{m}^3/\text{s}]$ とすると、これに加えて図-1においてはその下流D点までに $12,000 (\text{m}^3/\text{km}/\text{d})$ の割合で流量増加があり、図-2ではAD間で $1,193 (\text{m}^3/\text{km}/\text{d})$ の流量増加と、B点における $864 (\text{m}^3/\text{d})$ の集中流入とがあり、図-3ではB点における $7,200 (\text{m}^3/\text{d})$ の集中流入があるだけである。

河川水と流入水あるいは処理放流水との混合水については、標準的な脱酸素反応速度定数値をとり、すべ

表-1 図-1, 図-2, 図-3の試算条件

流域：帯状；(巾, $15+15 = 30\text{km}$) \times (長さ 6km) = 180km^2
流域人口：P = $(200\text{人}/\text{km}^2) \times 180\text{km}^2 = 36,000\text{人}$, $36,000\text{人} \div 6\text{km} = 6,000\text{人}/\text{km}$
流量(Q)：A点(河川)； $43,200\text{m}^3/\text{d} = 0.5\text{m}^3/\text{s}$, 下水； $200\text{l}/\text{人}/\text{d}$, し尿； $1.2\text{l}/\text{人}/\text{d}$ (処理時には20倍の清水希釈)
BOD ₅ 負荷量(l, L)： $48.6(\text{g}/\text{人}/\text{d})$, [内し尿のみ, $16.2(\text{g}/\text{人}/\text{d})$, その他, $32.4(\text{g}/\text{人}/\text{d})$]
A点(河川), 0；両岸流域からの等分布負荷の流達率は0.4； $\therefore l_0 = 116.64(\text{kg}/\text{km})$, $l'_0 = 77.76(\text{kg}/\text{km})$; $L'_b = 25.92(\text{kg}/\text{d})$, $L_b = 144(\text{kg}/\text{d})$
DO不足量の負荷量(D)：河川へのすべての流水について, 0 . ($D = Q \times (C_s - C)$, $C_s = \text{DO飽和濃度}$)
放流水のBOD ₅ 濃度基準：し尿処理場放流水, $\leq 30\text{mg}/\text{l}$, 下水処理場放流水, $\leq 20\text{mg}/\text{l}$
河川：AD間流下時間, $T = 2(\text{d})$; 流速, $U = 3\text{km}/\text{d}$; 流路長, $TU = 6\text{km}$; 水温 20°C , $\therefore C_s = 9.17\text{mg}/\text{l}$
反応速度定数(e を底とする)：脱酸素定数；好気性, $K_1 = 0.3(1/\text{d})$; 嫌気性, $K_3 = 0$; 再曝気定数； $K_2 = 0.3(1/\text{d})$

表-2 図-1, 図-2, 図-3中の L, D の両曲線のB, Dの2地点における諸数値

地点	項目	単位	図-1 (処理場なし)	図-2 (B点にし尿処理場あり)	図-3 (B点に下水処理場あり)
B点	BOD ₅ 量(L_b)	kg/d	30.2	45.9	144
	BOD ₅ 濃度	mg/l	0.65	0.98	2.88
	D量(D_b)	kg/d	56.2	37.4	0
	D濃度	mg/l	1.20	0.80	0
	流量(Q_b)	m^3/d	46,800	46,779	50,400
D点	BOD ₅ 量(L_d)	kg/d	52.6	54.3	107
	BOD ₅ 濃度	mg/d	1.04	1.06	2.12
	D量(D_d)	kg/d	91.0	55.1	32.0
	D濃度	mg/l	1.81	1.08	0.635
	流量(Q_d)	m^3/d	50,400	51,222	50,400

て $K_1=0.3(1/d)$, すなわち $k_1=0.1303(1/d)$ とする²⁾。またこの河川の再曝気定数も $K_2=0.3(1/d)$, $k_2=0.1303(1/d)$ とするが, この値は中程度の水深のよどんだ河川に対応する値であり²⁾, 平均流速が $3.5(\text{cm/s})$ で, 水深 1.2m , 幅 12m の長方形流路断面を備え, $1/8,000$ の縦断勾配をもって流れるような河川を想定すれば, O'Connor-Dobbins 式によってこの程度の k_2 値が得られる²⁾。以上に述べた計算条件をまとめて示すと表-1 のようになる。

この例では, $f=1$ となって式(2-1)', 式(1-2), 式(2-2) を利用することができる。しかし, ここでは AD 間を等小間隔に区切り, 式(1), 式(2)により, 電算機を用いて各区間ごとに L , D を求め, 原点を右方に移動させながら次々と区間ごとにこうした計算を進めていって求めた結果を, 図-1~3 の下図に示し, またそれらの B, D の 2 点における負荷量の値を, 河川流量と濃度との値とともに一覧として表-2 に示す。

これらの図表からわかるように, 図-2 のように B 点にし尿処理場を設けると, AB 間での河川水中の BOD_5 量と DO 不足量とは, 図-1 の処理場の無い場合に比べて $(2/3)$ に減少する。図-2 の場合, BOD_5 量は当然 B 点で急増するが, D 点では図-1 の場合とあまり差がなく, DO 不足量では図-2 の方が常に少なくなって, それだけ高い DO の量や濃度を保持し得るので有利となる。B 点に下水処理場を設けた図-3 の場合は, B 点以降 BOD_5 の量と濃度とは当然高くなるが, D 点におけるその濃度からみれば, 前 2 者の場合の環境基準類型の A から B へ移行するだけにすぎず, DO 不足量では常に最も有利となり, しかも AB 間の河川水は極めて良質(類型 AA) となることがわかる。もしもこうした処理場が無い場合は, 流達率が 1 の形をとって, この河川に大量の集中負荷が不法に投棄・放流されるような事態が生じる。

以上はあくまで計算例であって, K_1 , K_2 , K_3 の各仮定値, 流域や河川の形状や特性, 人口密度その他については, もっと実態に則した条件を考えなければならない。流域内の雨水, 両岸流域からの支川の固有流量, 浄化槽や工場排水(点源), 農業排水(し尿を除く, 非点源)などを無視し, それらがもたらす汚濁負荷や, 河川の固有流量の時間的変動を考慮しなかったこと等に, 今後の検討の余地が残されている。しかし, 電算機によれば, メッシュ法等により, たとえば流域が複雑な地形を呈しているような場合でも, こうした推算は可能である。

c. BOD , DO 以外の諸水質項目に関する改善効果

以上は BOD_5 と DO とのみにしぼって論じたが, こうした環境保全上の水質項目以外に, 人間の健康にも関連する大腸菌群数についても, 式(1)の系統の諸式は適用可能であり(Chickの法則による), その場合の k_1 は, 水温が 20°C の場合に $0.5(1/d)$ 程度の値をとるとされている。し尿や下水の処理場を設置する目的は, 上述の諸項目以外の生活環境, およびとくに人間の健康に関連する諸水質項目について, 放流先水域の水質を保全するためであり, とくに水道の取水とは密接な関係を持っている。こうした点については, 後で論じることにする。

2. 琵琶湖・淀川水系の例について

a. 淀川の中・下流部での水質改善状況

過去における、1次(初沈)処理に2次(生物+終沈)処理を加えただけの下水処理施設からの放流水では、放流先水域の水質上の要求度が高い場合には、不十分となりやすい。たとえば図-4に示す淀川水系の枚方地点では、そこでの固有流量のうち、処理場や事業場からの $50\text{m}^3/\text{d}$ 以上の排水の総量は $2,030,000\text{m}^3/\text{d}$ に達し、そのうちの50%は桂川からの流入分であり、その分の約75%は昭和51年度で人口普及率が48.1%に達した京都市の下水処理場からの放流水である。次に、総人口が約130万人の京都市の下水道の進捗度とともに下流の水質改善の度合いを、昭和40~51年の12年間の各年平均濃度から調べてみる³⁾。

淀川本流への流入直前の桂川宮前橋の BOD_5 の濃度については、昭和42年までは上昇し、それ以降は下降して、昭和49年に最小の $4.4\text{mg}/\text{l}$ に達したが、その後やや増加の傾向にあり、京都市下水道事業の伸びとほぼ正確に対応していることがわかる。淀川本流の3川合流直後の枚方大橋の BOD_5 の濃度については、昭和46年頃までは桂川の影響を受けて本流右岸側が左岸側よりも高かったが、⁴⁾右岸側では宮前橋地点と同様に昭和44年以来低下をつづけ、昭和49年には $2.8\text{mg}/\text{l}$ までになった。本流左岸側では逆に昭和48年にはいったん上昇したが、その後は低下している。いずれにしても、左支木津川流域での宅地開発や、左岸の大阪府沿岸からの汚水流入のために、昭和44年以降は右岸よりも左岸のほうが高くなってきている。

NH_4^+-N の経年変化については、その濃度は桂川宮前橋で $1.3\sim 4.6\text{mg}/\text{l}$ 、枚方大橋の右岸で $0.5\sim 1.4\text{mg}/\text{l}$ 、同左岸で $0.1\sim 0.5\text{mg}/\text{l}$ の間に変動し、一定の傾向は認められない。

とくに水温が 20°C より低くなると、硝化作用が不活発となるため、ふつうの下水処理や初期の自浄作用による NH_4^+-N の減少は期待できない。人口の多い京都市からの放流下水の影響を受ける枚方大橋右岸の NH_4^+-N 濃度のほうが、同左岸のそれより高いことは、こうした原因にもとづくと思われる。淀川のように下流が水道水源となっている場合は、 NH_4^+-N 濃度が $1\text{mg}/\text{l}$ 程度以上となると、浄水における不連続点塩素消毒法の効果が激減し、とくに冬季濁水時に障害が生じるので、こうした事態は極力防がなければならない。

以上のような検討法では、下水道・下水処理の進歩による下流水質の改善効果を正確に判定することはできない。そうした判定のために、次式のような百分率E(%)を考える。

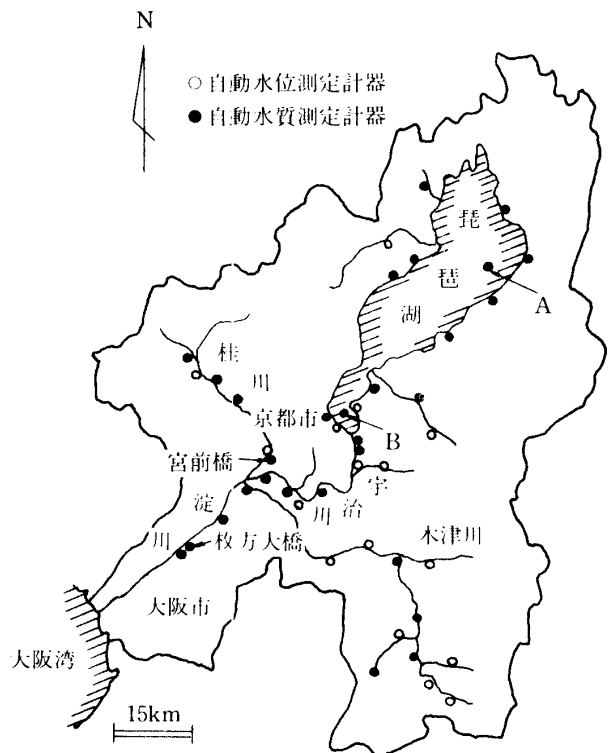


図-4 琵琶湖・淀川流域の概念図

$$E(\%) = \left\{ \frac{\text{当該地点での検水の}(c/Cl^-)}{\text{京都市鳥羽下水処理場流入下水の}(c/Cl^-)} \right\} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 c は BOD_5 、または NH_4^+-N の濃度、 Cl^- は塩素イオン濃度である。すなわち、 Cl^- 濃度は希釈以外の生物処理や自浄作用等によっては変化しないということを利用し、したがって (c/Cl^-) は当該水質項目の負荷量に正比例する標準値となるから、 $E(\%)$ は鳥羽処理場での未処理分と、その放流口から下流の当該地点までの流入分との和から、放流口下流での河川中の自浄作用による除去分を差し引いた残存負荷量と、鳥羽処理場流入水による負荷量との比率を示す値となり、これは京都市の主処理場である鳥羽処理場で、京都市全域の80%からの負荷量をどれほど処理したか、という比率によって支配される。

ゆえに $E(\%)$ は、当該水質項目についての未処理分の残留百分率の近似値であると解されるので、未処理負荷指数(Untreated Loading Index, ULI)と名付ける。 BOD_5 、 NH_4^+-N について、この $E(\%)$ はともに最終的には3%程度まで低下するであろうことが、他のある小流域における調査からわかった。

この両水質項目について、前記の2地点(3採水点)での $E(\%)$ 値の経年変化を調べてみると、 BOD_5 に関しては、桂川宮宮前橋では、昭和42年の10%から京都市下水道事業の伸びと明らかに反比例して減少し、また枚方大橋では、その右岸では昭和44年まではほぼ6%の一定値を、それ以降は減少して4%にいたるが、その左岸では昭和44年以降に BOD_5 は逆転して右岸より高くなり、 $E(\%)$ は4%までの低下にとどまっている。

NH_4^+-N の $E(\%)$ 値については、枚方大橋左岸で昭和51年にやや増加しているほか、昭和49、50の両年では各地点で減少したと認められる程度で、一定の傾向はなく、3%から34%までに分布している。

以上には、淀川水系の中・下流部の事例を紹介したが、一般的にいて生活環境項目でとりあげられる BOD 、 DO については、上派で2次処理までの下水処理が進めば、放流先水域では第2段階(窒素系)の BOD 消費曲線にまでたち入るために、 NH_4^+-N は $NO_2^- - N$ 、 $NO_3^- - N$ に変わっていくが、こうした現象は淀川下流部ですでに認められており、慣用法による BOD_5 の測定値が20%以上も過大となるという傾向が生じている。

筆者は滋賀県水質審議会の部会長として、琵琶湖水の富栄養化防止のために、世界で最初の窒素の規制基準の設定を試み、これが実施される段階に達したが、⁵⁾リン以外に窒素を規制することは、富栄養化、赤潮、水稲の徒長の防止対策である以外に、次のように、人間健康項目としても注目されるにいたっている。すなわち、水道においては、前記の塩素消毒障害以外に、トリハロメタン問題(間接的)やニトロサミンのような発ガン原因物質、さらには幼児のメトヘモグロビン血症などの原因となる $NO_2^- - N$ 、 $NO_3^- - N$ が警戒され始めている。工・農業・水産・観光用の水に対する各種の生活環境項目以外に、やはり、重金属、有機リン、PCBなどの人間健康項目は重要視されなければならない。

約1,300万人の飲料水源となっている淀川水系では、これらの項目は厳しく監視されているが、

今後の下水道の計画をたてるときに、ともすればこうした有害物を混入しやすい工場・事業所からの排水に対して、どの程度までそれらの混入を許すか、またその監視体制をどうするかについては、改めて述べることにする。

b. 琵琶湖水の富栄養化のシミュレーションと対策

琵琶湖に入り、そこに留まり、または流出する栄養塩類（N，P）については、筆者を委員長とする土木学会の「琵琶湖の将来水質」委員会で昭和44年から検討が進められ、^{6),7)}また滋賀県当局においても調査・推測された。すなわち、NとPとのそれぞれについて、(t/yr)の単位をもって、家庭下水（し尿，その他）、工業（食品，繊維，化学，電子）、畜産（牛，豚）、農業（水田，その他の農場）からの人為的負荷量，および森林，化学的降下物（北湖と南湖に分ける），地下水（北湖と南湖に分ける）由来の自然的負荷量を，原単位（たとえばg/人・d等）を設定した上で、これに量的指標を乗じて推定した。そのために多くの採水点でのN，Pの濃度を実測したが、たとえば133の流入河川についての実測・観測と計算とを繰返して、いわゆる流達率を推定するなど、長期間にわたり多大の努力が払われた。

その結果，昭和50年度にはNの発生総負荷量の80.1%に当たる4,611t/yrが全湖に入り，そのうち2,420t/yrが瀬田川等によって湖外に流出する。また同年度のPの発生総負荷量の51.0%に当たる514.1t/yrが全湖に入り，そのうち181.4t/yrが湖外に流出することがわかった。入ってくるN（P）の負荷量のうち，家庭系および工業系に由来するのは51%（78%）であり，農業および畜産に由来するのは12%（7%）となった。さらに将来における量的指標と原単位とを推定することにより，将来におけるN，P負荷量の湖への出入の収支を推定することも可能である。

栄養塩類（N，P），植物性プランクトン，動物性プランクトンと水質やバイオマスを含めた生態系モデルを作り，種々の実測データを集積した上で，琵琶湖の富栄養化のシミュレーションを行った。⁷⁾すなわち図-5に示すようにブロック-1（北湖）からブロック-3（南湖）へ流れるが，前者とブロック-2（北湖）の間には水深15mで温度躍層を生じ，この上下の間では循環が生じるが，その循環率は季節によって変動するとした。

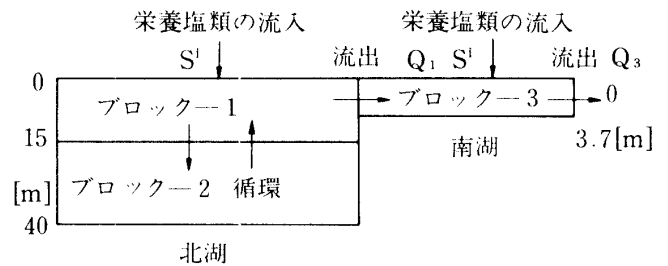


図-5 シミュレーションのために3ブロックに分けた琵琶湖の模式図

有機態窒素，無機態窒素，有機態りん，無機態りん，A型（珪ソウ類），B型（大型植物性），C型（その他）の3種のプランクトン（これらは繁殖期や動物性プランクトンによる捕食期によって分けた）および動物性プランクトンの各濃度をとって8種の変量($X^1 \sim X^8$)を設け，（無機態のN，P），（植物性プランクトンのA型），（全B型），（有機態のN，P），（動物性プランクトン）および（底泥）の相互間のN，Pの収支や生物学的循環を考慮し，実験，実測の結果から21種にわたる各種のパラメーターの値を想定して

$(dx_i^1/dt) \sim (dx_i^8/dt)$ の8個の方程式をたて、 i を1, 2, 3(図-5中のブロック番号)としてシミュレーションを行った。

プランクトン群の消長が激しいので、特に湖水表層の植物性プランクトンの種の同定や個体数の測定、化学分析は、1週間に2回もの頻度で実施された。図-4中のA, Bの2点では、物理的な項目、すなわち水温、流速等々をも測定した。図-6, 図-7中には、A, B, Cの3つの型の植物性プランクトンについて、A, B両地点での実測値とシミュレーションの結果とを対比して示した(昭和50年度)。中の広い変動がこれらの図中に示されるので、はじめから実測値と計算値の適合性をねらうよりも、まずいかにして各パラメーターの最適値を選ぶかを考究したほうがよいことがわかった。

前述のように滋賀県水質審議会の部会長として、筆者は窒素等に係る排出基準の策定に従事した。すなわち、昭和60年の目標水質を各々北湖(南湖)についての中央表層水の年平均値として、りん(T-P)で0.010(0.015)、窒素(T-N)で0.25(0.30)[すべて(mg/l)単位]以下とするために、将来水質を予測して削減量を検討し、それを可能とするような排水中の窒素、りん処理技術とそのコストとを調査し、最後に9種の業種に工場、事業場を分類し、排水量を3つに区分し、それぞれ新設分と既設分とについて、予測された削減負荷量に見合うように(T-N)と(T-P)との各54種の排水濃度基準値を定め、監視測定のありかたやN, Pの分析方法を定めた。この基準は、昭和56年度中に実際に施行されることになる。こうした規制によって富栄養化が防止され、また

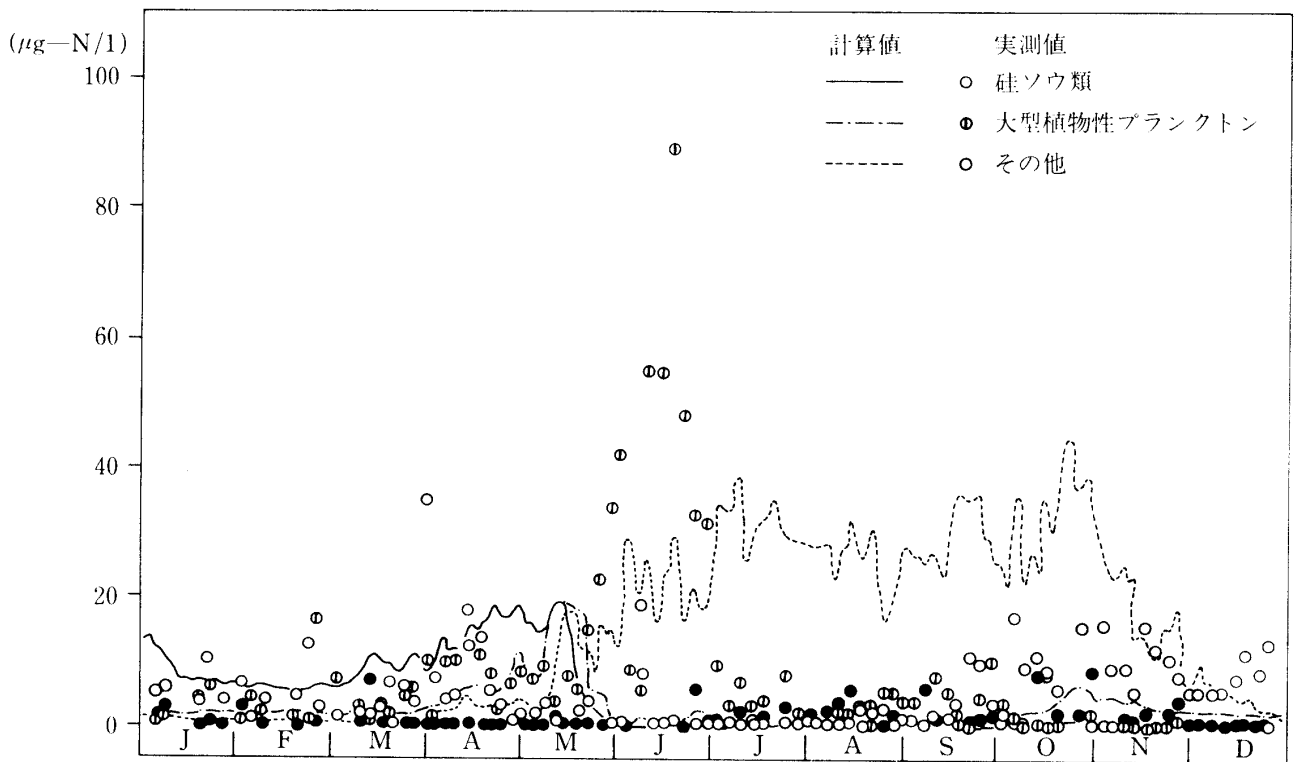
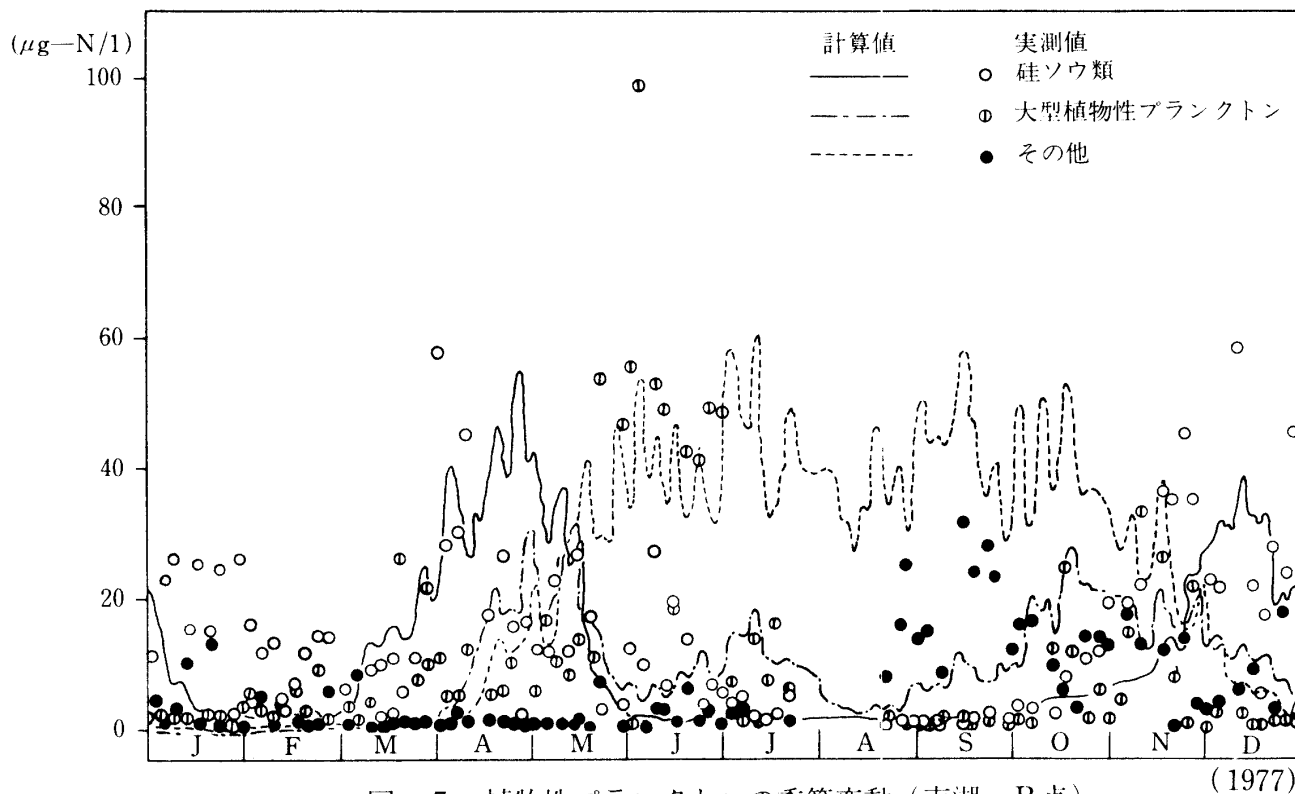


図-6 植物性プランクトンの季節変動(北湖, A点)

(1977)

前述のようなシミュレーションや水文予測の結果を利用して、琵琶湖から下流への放流量が、湖水質までを考慮して制御されうるようになることを期待している。



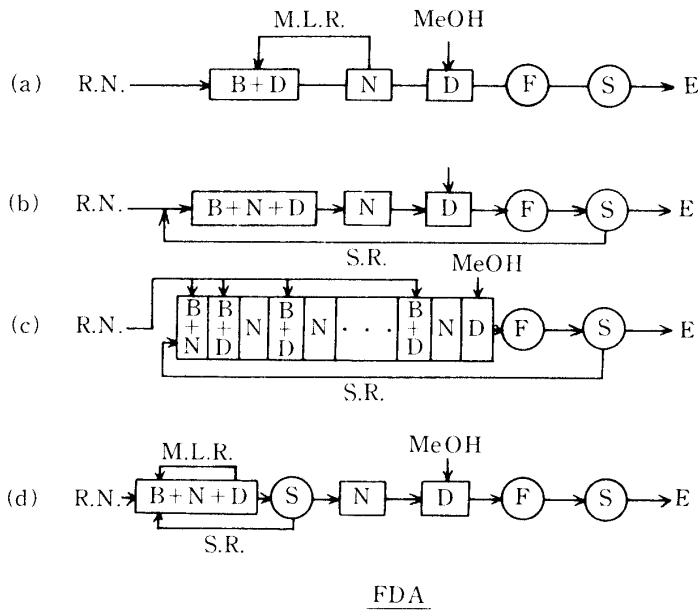
図一七 植物性プランクトンの季節変動（南湖，B点）

c. 有機排水からの窒素除去

上記の排水基準値のうちでも、りんについては凝集沈殿等により容易に除去できるが、下水道がほとんど未完成の本湖流域では、非点源生活系排水中の陰イオン界面活性剤が問題となり、これは他の委員会で検討されることになった。つぎに窒素については、たとえば(T-N)に対する食料品製造業の($\geq 1,000\text{m}^3/\text{d}$)で既設分の $15(\text{mg/l})$ 、新設分の $10(\text{mg/l})$ (ともに最大値)は厳しすぎるという見方があるかも知れない。しかし既設分に関しては実在工場についての調査から、その工場の努力によって $15(\text{mg/l})$ がすでにクリアーされていることがわかったのである。また中小各種企業に対してはマニュアルを作成し、技術指導を進めることにした。

最大の点源であるし尿処理施設に対し、(T-N)で既設分の $20(\text{mg/l})$ 、新設分で $10(\text{mg/l})$ 、(T-P)で各 $2(\text{mg/l})$ 、 $1(\text{mg/l})$ (すべて平均値)も厳しいが、(T-P)については容易に解決しうる。(T-N)については筆者の研究グループの開発したFDA (Facultative Denitro-Aeration, 通性脱窒曝気)法が彦根市で適用され、昨和53年春から4~5倍の希釈水をもって(T-N) $\cong 6(\text{mg/l})$ で飲用適の放流水を出しており、建設費、運転費ともに少しの増額を見るだけで上記の基準値を守りうるということがわかったので、あえてこうした基準値を制定することにした。

わが国でのし尿の硝化・脱窒処理の代表的な4方式を示す図-8において、FDA法は(d)に描



R.N. : 生し尿(前処理済み), B : BOD除去, N : 硝(酸)化,
 D : 脱窒, F : フラッシュ曝気
 M.L.R. : 混合液循環, S.R. : 汚染循環,
 MeOH : メタノール, S : 沈殿, E : 放流水

図-8 し尿の硝化・脱窒処理の代表的な4方式

ている(B+N), (B+D), (N)の各そうを, 最後の2そうを除いて, 全部を第1そうとしてまとめ, その直後に沈殿そう(汚泥は循環)を置いた形となっている。

こうした点でFDA方式は図-8中の(c)によく以ている。すなわち第1そう(FDAそう)では硝化菌と脱窒菌との双方が働き, 生し尿や循環汚染によって中和や硝化後のエネルギー源としての有機炭素化合物の供給が行われ, NaOHやMeOHを添加しなくても有機性窒素 $\rightarrow \text{NH}_4\text{-N} \rightarrow \text{NO}_x\text{-N} \rightarrow \text{N}_2$ ↑の脱窒がBOD除去と同時にされるので, 運転費が節減でき, 運転管理の技術的, 経済的な面でも利点があり, 処理水も安定している。その後の再度の硝化, 脱窒, 沈殿等の工程も楽であり, 処理効率も高くなる。FDA方式の利点は, M.L.R.やS.R.の循環距離が短くて, 返送用動力が節減でき, また希釈水などによる冬季冷却が防げるために, FDAそう内のMLSS(混合液浮遊物質)濃度が12,000(mg/l)までも上昇し, そのために汚泥日冷がそれだけ長くなり, それに反比例してそうの容積を小さくし, 建設費を少なくすることができることにあり, (c)方式ではMLSS濃度は低いようである。

図-8における4方式の系統図では, 希釈水やアルカリなどの流入・添加の場所については省略した。FDA方式ではFDAそうへの流入前にし尿とはほぼ等量の雑用水で自動的に希釈され, その後の第2の曝気そうの消泡水でし尿の1.5倍, 凝集分離としての加圧浮上そうの加圧水として

かれている。こうした方式の開発に当り, 浄化そう引抜き汚泥を含む場合, 約1万(mg/l)程度のBOD₅に加え, 数千(mg/l)もの窒素を含有する原し尿に対し, 脱窒工程をいかに合理的に組み込むかが先行され, その結果単位処理工程の多元化が試行された。その結果として開発されたのが図-8中の(a), (b)の2方式である。(d)に示すFDA方式では, (a)における第1, 第2の両そうを合わせて一つのそう(FDAそう, 好気性消化そう)のみとし, その内部で栓流方式により曝気処理し, 最終脱離液をそうの先端部へ動力の少ないエアリフトポンプで返送し, その次に沈殿そうを置き, その汚泥をもFDAそうへ循環させている。すなわち, (b)方式において分け

し尿の1.75倍を加えて、全部で5～6倍の清水希釈となるようにするが、こうした方法でFDA
 そう後の第1沈殿そうの直後でBOD₅の95%、COD_{Mn}の90%および(T-N)の95%が除去され
 ており、もし流出水のCl⁻濃度を600mg/lよりも高くしてもよいならば、3～4倍の希釈で済む。
 BOD₅、COD、(T-N)、SSについては、その後の処理によってさらに除去率は高まる。ただ
 し、FDA そう内のDO(溶存酸素)をある限度以内に留め、pHによって制御する必要がある。
 またFDA そうは投入し尿の12日分の容積を持たすが、ここではその他の各種のそうの容積や循
 環(返送)比、送気量、注薬量等の詳細についての説明は省く。今後あるべき高度処理の模式図
 を図-9に示すが、彦根市ではa線までのFDA方式に加え、b線までの図-8中のN、D、F
 の処理を付け、さらに凝集、加圧浮上、オゾン酸化(脱色)および砂濾過により、りんやCOD
 も大いに除去されて、浄化そう汚泥を含み、BOD₅=7,000、COD_{Mn}=2,600、(T-N)=3,600、
 (PO₄-P)=700、Cl⁻=2,800(各mg/l)のし尿に対し、pH(28°C)=7.2、色度=5°、透視度>30cm、
 大腸菌群MPN=0(個/ml)で、BOD₅=0.4、COD_{Mn}=3.7、SS≤1、(T-N)=3.46、(T-P)
 =0.41、Cl⁻=180[各(mg/l)]のような飲用適の放流水(昭・53・7・10日)を出している⁹⁾。また
 図-9中のa、b両線間の各処理には、筆
 者等の開発したSBF(Submerged Biologi-
 cal Filter, 浸漬生物濾床)¹¹⁾がきわめて有
 効である。

またFDA方式は、約10年前に曝気不十分と思われた低BOD負荷の長時間曝気方式の団地下水処理場を調査した結果からヒントを得て開発された方式であるので、これを下水処理に適用することは可能である
 と考える。また事実、筆者はそうした計画についての種々の相談を受けており、下水
 についての追加実験を進めて、その浄化機
 構を速度論的に解明しつつある。

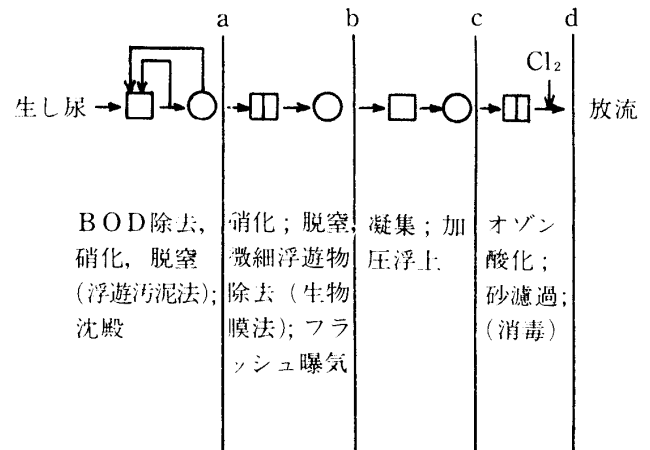


図-9 今後のし尿高度処理方式

結 論

昭和52年9月12～16日に西独のエッセン市で、IAWPR主催の河川流域管理に関する第1回専門会議が開催され、テムス、セーヌ、ライン、ドナウ、オハイオ、ミシシッピ等々の各河川流域の水質管理の衝にあたる科学技術者が一堂に会し、論文発表と討議とを行った。筆者もとくに懇請されて出席し、琵琶湖・淀川水系、とくにその中・下流部における水質管理の状況と、筆者等による調査研究の成果とを発表した。すなわち、京都市内河川における環境基準を充たすためには、市域を区切った各メッシュ内で、工業出荷額〔(億円/年)単位〕をどのくらいずつ減少させなければならないか、の試算結果や、下流のある地点での連続水質分析の結果を数理解析して、

上流の各汚濁源での汚濁物質の流入状態を算出する手法などを発表し¹²⁾、好評をえたが、ここでは再述しない。

要するに本論文では、(1)し尿処理や下水処理による放流先河川のBODとDOとに関する水質改善の程度を、Streeter-Phelps-Thomas式を用いて推測する手法を開発し、その適用例を示したが、こうした自浄作用は下水管きょ内の流下過程でも生じているので、これを今後の研究課題としたい。また(2)、(a)上流部での2次処理までの下水処理が進むために下流部の上水道源で生じる新問題を提起し、淀川に関してその実態を究明し、(b)湖沼における富栄養化に関するシミュレーションの手法を開発して琵琶湖水に適用し、実測値との適合性が良好であることを認めた。また昭和54年10月に制定された「各種排水中の窒素等の基準に関する」滋賀県条例の策定の経緯を説明した。(c)さらに(a)の問題と(b)で述べた富栄養化とを解決、防止するためには、窒素除去を目的とする高度処理が必要となるので、そのために筆者らが開発したFDA方式を論述し、これを彦根市のし尿処理に適用して、すでに約3年にわたって、建設や処理の費用の高騰を見ずに、飲用適の放流水を得ているという結果を紹介した。なお本論文で得た成果は、淡水域のみでなく、海水域における汚濁対策にも応用され、あるいは参考とされ得るであろう。

- 1) 岩井重久：淀川水系の水質保全について、京大工研彙報，24号，昭和38年9月，76（一部訂正）。
- 2) 岩井重久：防災ハンドブック，7編，3章，技報堂，昭和39年12月（一部訂正）。
- 3) 岩井重久：日本の水質汚濁と水道，水道協会雑誌，528号，昭和53年9月，58。
- 4) Iwai, S. and Nanbu, S. : Evaluation of self-purification of short streams, Tech. Rept. of Eng. Research Inst., Kyoto Univ., 11, 10, Rept. 87, 1961.
- 5) 岩井重久：琵琶湖の水質基準設定の記：水処理技術，22巻，1号，昭和56年1月，1。
- 6) Iwai, S. and Inoue, Y. : Eutrophication of Lake Biwa, nutrient load generation, Proc. Int'l Cong. on Human Env. (HESC), Kyoto, The Asahi Evening News, 1976, 419.
- 7) Inoue, Y., Iwai, S., Ikeda, S. and Kunimatsu, T. : Eutrophication of Lake of Biwa-Nutrient loadings and ecological model-, Preprint of 21st Assembly of SIL, Kyoto, Aug. 1980, B2-Sam-9.
- 8) Iwai, S. : In anticipation of new technologies for handling and disposal of sludge, Proc. 9th Int'l Conf. on Water Poll'n Research, Stockholm, 1978.
- 9) 竹山兵三，小川喜三郎：し尿処理場の高度処理施設と運転管理（1）—好気性消化槽における窒素除去—，水処理技術，20巻，4号，昭和54年4月，345。
- 10) 岩井重久，大森英昭：し尿の生物的処理の跡をたどり，今後を期待する，1：微生物と資源，1巻，3号，昭和55年3月，5。
- 11) 岩井重久：浸漬生物濾床法の開発，土木学会誌，64巻，1号，昭和54年1月，105。
- 12) Iwai, S. and Sumitomo, H. : Water quality management in Japanese lakes and streams, Proc. Specialized Conf. on River Basin Management, (IAWPR), Essen, 1977, 13-1 .