

(1) 多摩川における自浄能力の推定に関する方法論

METHODOLOGY FOR THE ESTIMATION OF SELF-PURIFICATION, IN THE TAMA RIVER, JAPAN

○市川 新*, 玉井信行**, 広沢佑輔**, 横山道子*, 中山喜雄*, 天野耕二*
Arata ICHI KAWA*, Nobuyuki TAMAI**, Yusuke HIROSAWA**
Michiko YOKOYAMA*, Yoshio NAKAYAMA*, Kohji AMANO*

ABSTRACT; In order to describe or reproduce the real water conditions in the river, we propose a method for adjustment of the observed data which we obtained in our river survey. By using these adjusted parameters, the mass-balances of flux and pollutants hold well, so we define it as a "reasonable water condition. And also, these reasonable parameters were used in models based on the Streeter-Phelps equation describing self purification in a river. The results predicted by these model studies were then compared with the actual conditions in the Tama River. In some cases it was possible, and permissible, to make modifications to the model which improved the agreement between the predicted and the observed results; in other cases, this was not permissible.

KEY WORDS; River water quality, self-purification of rivers, simulation of water quality, BOD, total-nitrogen, mass-balance in rivers.

1. 研究の目的

河川が自浄力を有している事は言うまでもない事であるが、それを「定量的」に記述する事は今の所ほとんど行なわれていない。その理由はいろいろあるが、主なものは、(1) 自浄作用と一口にいても実際にはいくつもの現象が重なりあい、個々のつみ上げが困難である。(2) 日本の河川の場合、流況が一様でないため、正確に汚染物質を追跡することが困難である。(3) 自浄作用を評価出来るような採水・分析法の精度が伴っていない。(4) 河川の水利条件（とくに流下時間）に関する情報が少ない、等をあげることが出来る。本研究では、現在の「技術水準」（費用・人力・精度を勘案したもの）を結集し、上記の問題点を出来るだけ克服するように努めながら、多摩川中流部（羽村—上野毛間約38km）の自浄能力の推定を行ったので、ここに報告する。

2. 研究手法

研究手法については既に報告^①しているので、ここでは概要のみを述べる。

- ①対象区間 羽村—上野毛区間 本川 25地点、支川・流入樋管・取水地点等 43地点
- ②調査期間 昭和56年8月6日～8日、流下時間を別途推定し、本川各地点の採水時間をずらし、かつ各地点とも24時間連続採水・流量観測を行った。
- ③測定項目 流量（河川断面形・流速分布）水質（BOD・COD・電導度・各態窒素・各態リン・pH・水温）
- ④解析手法 ストリーターヘルプス型モデルの修正、およびマニング式による定常モデル^②
- ⑤基本的考え方 以上の調査により、多摩川中流部の水質環境を把握し、その現象を自浄作用の理論から説明するという方法論をとった。

*東京大学工学部都市工学科 Dept. of Urban Eng., Univ. of Tokyo, **同土木工学科 Dept. of Civil Eng., Univ. of Tokyo.

3. 調査結果

各地点で24時間の採水調査を行ったが、作業の手に間に差があったため「仮想した流下時間」通りに採水調査は行えなかった。そこで、第1次近似として測定された、水質・流量の平均値を「日平均値」とみなして、それをもって「多摩川」の水質の代表値とした。負荷量については「負荷量の平均値」をとる事とした。なお、東京都公害研^③のように採水時間に合わせた「加重平均」は、行なわなかった。これは本川の流量観測に1時間近くかかるため、調査時間をきめる方法がなかったことによる。図-1は、その結果である。

この図によると、流量は、流れ方向に変動しており「下流にいくに従い漸増する」というパターンとはなっていない。多摩川の場合、途中で流入・流出が多いため、流れ方向の流量に変動はあるので、このような変動を測定誤差とはいききれない。そこで図-2に、各測定点毎の流量収支を求めてみた。すなわち図-3のように本川の2断面をとりその区間に流入・流出する量を図のようにとり、図-2の横軸に下流流量 Q_L 、縦軸に、上流からの合計量($Q_u + Q_i - Q_o$)をとり、プロットしたものである。プロット点については、上流地点の記号が記してある。もし、流量収支があうならこの点は、45°の線上に位置するが、図-2にみるように、45°の線からかなりはずれている。この原因は、本川での流量測定の精度によるものであろう。例えば、測定期間中の水位変動が5 cmあると河川幅60 m、平均流速40 cm/sとすると、1.2 m/sの差となる。同様に、横断形状でも、石や水路の深みの存在により、5 cm程度の誤差がある。さらに、横断方向の流速の変動も、4 mおきの測定で追跡しきれないため、このような誤差が生じたものと思われる。

この誤差を評価するために、電導度の負荷量を基に「推定流量」を求めてみた。この方法は、次の仮定による。①最上流の流量は正しいものとする。②流入・流出量は、本川に較べて測定が容易なため正しく測定されているものとする。③測定電導度は正しい。④ $Q_L = (Q_u \cdot C_u + \sum Q_i \cdot C_i - \sum Q_o \cdot C_o) / C_L$ (図-3 参照; Cは電導度を示す)とし、以下順次下流に降っていくものとする。このようにして求められた「推定流量」で流入・流出の収支をとり、

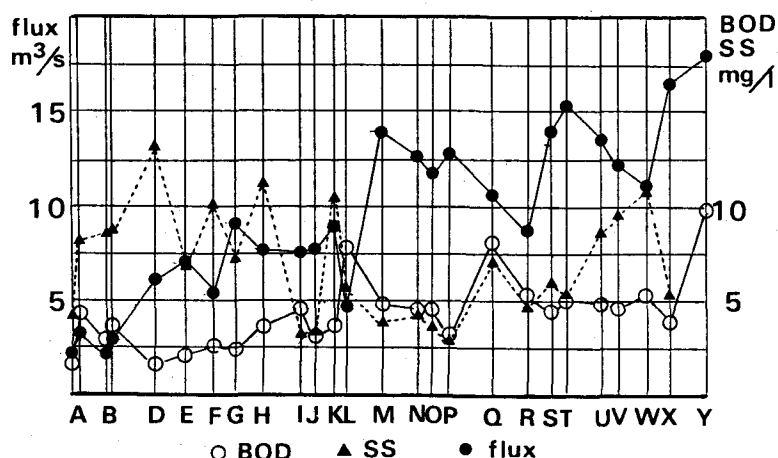


Fig.-1 Profile of Water Conditions

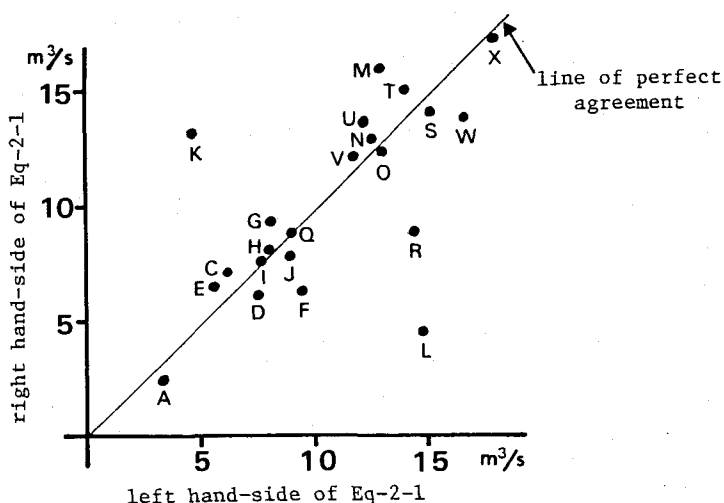


Fig.-2 Comparison of massbalances at upper and lower sections by observed flux

図-2と同じ方法でプロットすると、図-4に示すようになる。この図でみてわかるように「推定流量」は、収支があり、この流量が「確からしい流量」といえよう。図-5は、横軸に実測、縦軸に推定流量をとったものである。推定流量を「真値」として、それから±10%の誤差の範囲にあるのは、本川24地点（最上流は除く）の中16地点となっており、本研究の流量測定は、ほぼ妥当だったといえよう。ただ、L地点のみは小さすぎる値となっている。

4. 「推定流量」の評価と確からしい水質

3.で求めた推定流量を基にして、水質負荷量を取り、図-2と同じような表示をしてみたのが、図-6である。ここでは、図面の関係でBOD, TN, SSを示した。

BODについてみると、多くの点は、45°の直線

の近くにある。しかし、(P, Q) (K, L)とX地点は、45°の線から大きくはなれている。もう少し詳しくみると(P, Q) (K, L)の点は、それぞれ45°の線にはほぼ対象の所に位置している。この図の作製方法からみて、本川での測定に誤差が大きく、実際よりも大きな値が測定されると、その地点と上流との間で収支をとると、プロット位置は、45°の線より下側にくる。一方その地点と下流地点との間で収支をとると、45°の線より上側にくる。もし、この点以外の実測値が正しいときに誤差をもった測定点の値に正しい値を入れたとき、上にのべたプロット位置は「上流で収支をとったときは、X軸に平行に移動し、45°の線に近づき」「下流で収支をとると、Y軸に平行に移動して45°の線に近づく」ことになる。すなわち、両点（例えばP, Q地点）から平行移動した点（図中の△印）が「確からしい負荷量」となる。(K, L)地点についても同じように、△印で示してある。このように「Lおよび、Q」地点のBODの「確からしい水質」が求められる。なお、X-Y区間においては、Y地点の測定結果が、上流からの流入量に比して大きい事がわかるが、Y地点が調査の最下流地点のため、測定誤差なのか、どうかあき

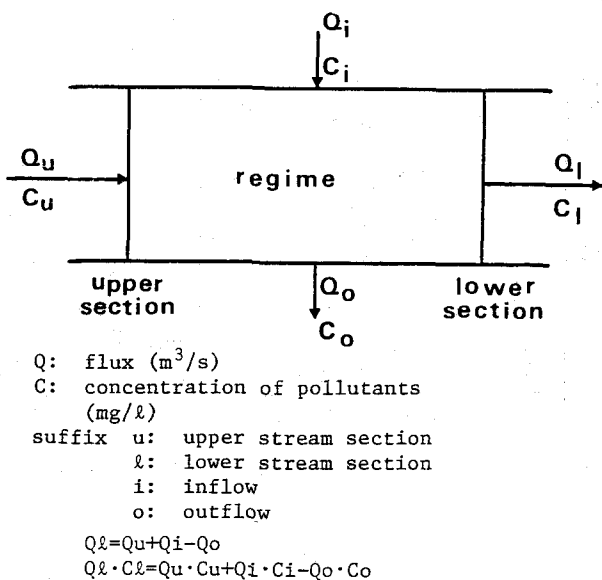


Fig.-3

Conceptual Model of Regime with in- and outflow

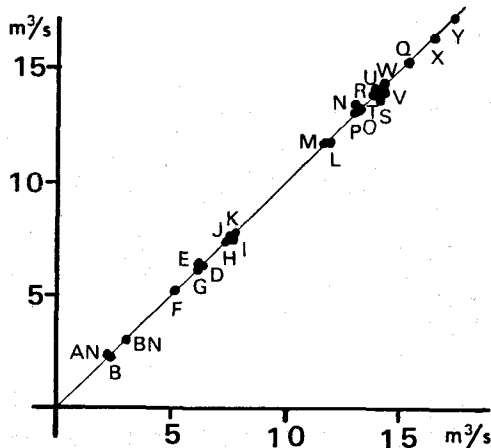


Fig.-4 Comparison of mass balances at upper and lower section by a modified flux

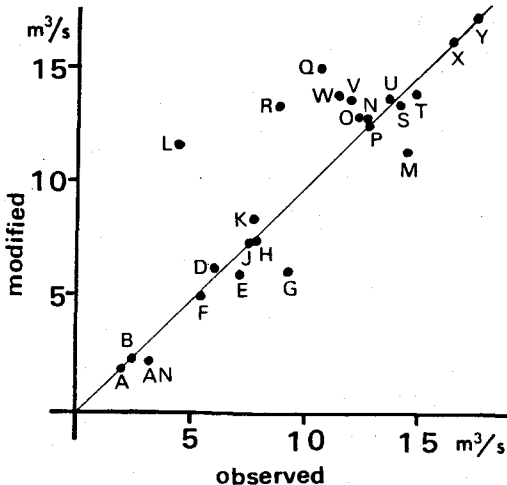


Fig.-5 Comparison of observed and modified flux

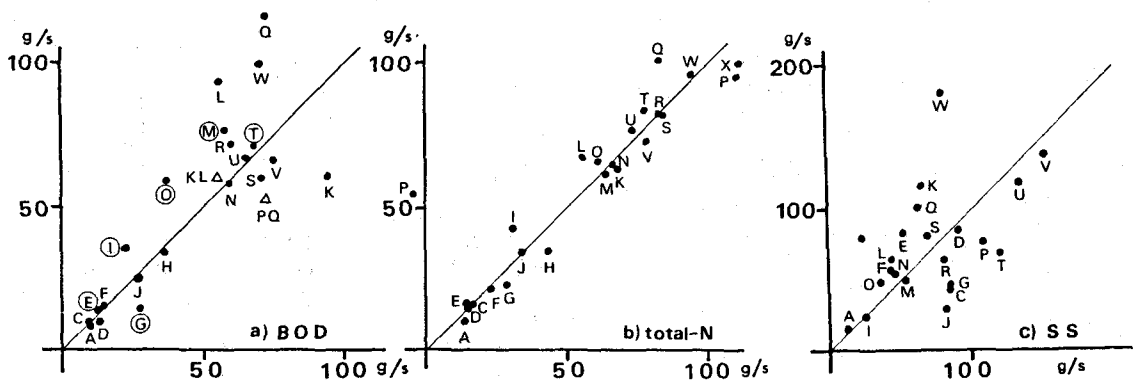


Fig.- 6 Comparison of mass balance of pollutants

らかにする事が出来なかった。

図-6のBOD図の地点に○印をつけた所(D, E, G, M, T)は、堰のある地点である。G地点を除くと、(E, I, D, M)の点は、45°の線より上側ではほぼ直線上に並んでいる。これは、堰地点で流速が小さくなり、浮遊性物質の一部が、堰前面の湛水部で沈澱し「みかけ上の自浄作用」がおきているためと考えられる。

CODについては、紙面の関係で示さなかったが、BODと同じような関係にあった。

全窒素は、ほとんどすべての区間で収支がとれている事がわかる。窒素の分析が正しい事からも「確からしい流量」が実際の流れの状況をかなりの程度、表現しているものという事が出来る。より詳しくみると、(H, I)地点、(P, Q)地点が、45°の線からはなれている。(H, I)についていえば、BODでみたように、I地点の値が大きすぎたためといえよう。Pについては(P, Q)が、45°の線に対象の位置となっていない。もしQの実測値が大きすぎ、PをX軸に平行に移動させて、45°の線にもってきたとしても、Q点は、45°の線とは、はなれた位置にある。

これは、PQ間に流入する是政悪水(北多摩1号下水処理場の処理水も含まれている)の窒素、リン分の濃度が大きいためと考えられる。これは、リンについて特にその傾向がつよい。この事は、是政悪水の検水が、是政悪水の代表的サンプルを示していなかったためと考えられる。

全リンの収支は、全窒素と同じような傾向にあった。

図-6Cは、浮遊物質の収支図を示した。他の水質項目に比較して、45°の線からのずれが大きかった。これはSS測定の方法論から問題点が多く、全窒素・BODのように厳密な収支を比較出来ないためと考えられる。

図-6から「推定された流量」はほぼ河川の実態に近い事が予測される。もし「推定された流量」がその地点の値を示していないとすると、図-4、図-6のプロットは45°の線から大きく変動すると予想されるからである。図-4ではほぼ45°の線上にあるが、図-6によると、多くの点では45°の線上にあるが、一部の点でははずれているという事から、流量よりも「水質」に問

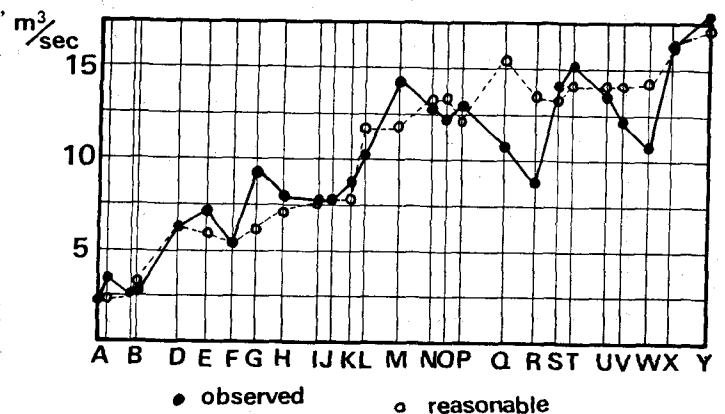


Fig.-7 Profile of observed and reasonable flux

題があるのではないかと推論される。以上の考察から上記により修正された水理条件を「確からしい水理条件」と定義することにする。

水質が「確からしくない」とすると、その原因は、①分析精度、②検水の代表性、の2つが考えられる。後者は流れの場とくに横断方向の水質の変動があり、「平均的」な検水を採水しなかった事による誤差と思われる。例えば、L, Q, Y地点の水質は、どの項目をみても「収支図からみる限りでは高めの値」となっている事から、検水採水に伴う誤差ではないかと思われる。「確からしい流量」と実測流量を図-7に示しておく。

5. 水質シミュレーションからみた「自浄係数」

以上の考察により「多摩川における確からしい水質・流況」があきらかになった。この現象をもとにして、自浄能力の評価を行ってみる。既に述べてきたように、多摩川では多くの流入・流出地点があるので、区間毎にわけて計算を行う。基本式は次式に示すように、Streeter-Phelps 型方程式を修正したものである。

$$\begin{aligned} \text{i) } \text{BOD} \frac{dB}{dt} &= -Kr \cdot B & (1) & \quad B: \text{BOD (20°C 5 日間)}, B': \text{窮極BODで} = 1.5B \\ \text{ii) } \text{被酸化態-N} \frac{dN}{dt} &= -KN \cdot N & (2) & \quad N: \text{被酸化性窒素 (全窒素-亜硝酸-硝酸)}, N' = 4.5N \\ \text{iii) } \text{DO} \frac{dD}{dt} &= Kr \cdot B' - K_2 \cdot D + KN \cdot N' & (3) & \quad D: \text{溶存酸素不足量 (飽和酸素量-実測酸素量)} \\ & & & \quad t: \text{時間}, Kr, K_2, KN: \text{定数 (1/日)} \end{aligned}$$

このモデルを適用するのに、決めねばならない因子がある。

① Kr, KN : 自浄係数といわれるもので、実測値(確からしい水質・流量)からきめる事が本研究の目的となっているものである。ここでは、それぞれ0.1～0.9の値を入れて、実測値にもっとも合致する値をもって、解とする方法をとった。

② K_2 : 再曝気係数といわれるものである。この係数の推定法はいろいろあるが、ここでは、Parkhurst-Pomeroy の式を用いる [$K_2 = 60 (V \cdot I)^{\frac{3}{8}} \cdot H^{-1.0}$] (V : 流速 (m/s) I : 勾配 H : 水深 (m))
この式は、河川の水理条件によって再曝気係数が定められる。水理条件については次項でのべる。

③ 流下時間(t): 基礎方程式を積分するとき、区間毎の積分区間(流下時間)が必要となる。流下時間は、河川の水理条件によって決定される。水理学によると、区間平均流速はマンニングの法則であらわされるが、これは、等流モデルというべきである。マンニングの式は、 $V = R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} / n$ [R : 径深(m), n : 粗度係数] で与えられる。この式の R も「区間全体の平均径深」を用いなければならないが、実測出来ないで、区間流量 Q および、区間平均河川幅 W を用いることとした。

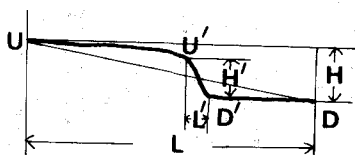


Fig-8 Conceptual model of water profile

$$Q = A \cdot V = W \cdot H \cdot V = W \cdot H^{\frac{5}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} / n \quad [A: \text{断面積 (m}^2\text{)}]$$

$$\therefore V = I^{0.3} (Q/W)^{0.4} / n^{0.6}$$

ここでは、流入・流出の行なわれている区間においては、流量 Q は一定であると考えている。 W は、河川測量でえられた数値や、参考とした航空写真から区間平均幅員を求めたものである。 I の水面勾配については、データがない。建設省京浜工事事務所では、毎年横断および縦断測量を行っているが、流下時間の推定には、粗すぎて用いる事が出来ない。というのは、多摩川のような平野部の河川でも、瀬と淵が交互にあり、瀬が20～50mで、淵が100～200mつづいている場合が多い^③。それ故、200mピッチで行っている建設省の測量では、この瀬の評価は、図-8に示すように、UDの平均勾配 (H/L) で与えられる。実際の河川では、図のように (H'/L') と ($(H-H')/(L-L')$) の2つの区間に分けられ、瀬の部分の流速が大きくても、流下距離が短いため、流下時間への影響が小さく ($H-H')/(L-L')$ によって流下時間がきめられる場合が多い。瀬の部分が、長さで区間の10%、水位差で50%であるとする、流下時間は平均勾配の25%増となり、水位差が75%の場合は、約75%増となる。この計算では河川の建設省のデータを

基にして、河川の踏査による判断を加えて、水面勾配をかえて、計算を行った。なお不定流モデルを用いて、流下時間を求めてみたが、等流モデルとほとんど差がなかったので、等流モデルの結果を用いた。

④窮極BOD (B') : Streeter - Phelpsのモデルで用いられるLに相当するものである。実測では、20°C 5日間BODを求めているので、ここでは、その値の、1.5倍とした。なお途中からの流入がある場合には、本川と流入水の負荷量の平均(加重平均)を求め、計算を行った。

⑤硝化に伴う酸素の減少(N') : 有機およびアンモニア性窒素が河川中で、硝酸になるものと考えた。これらの窒素1gが、硝化されるのに要する酸素量を、4.5gと考えた。厳密に言えば、亜硝酸も酸化されるし、アンモニア性窒素が、亜硝酸迄しか酸化されない事があるが、本川中の亜硝酸濃度が低いため、無視している。

⑥その他の項 : 河川中の溶存酸素は、上記以外にも光合成や、底泥により影響されるが、ここでは無視している。光合成を無視したのは、このモデルが「日平均量」をとっているためである。光合成を考慮に入れる場合には「水塊を追跡」するモデルにする必要がある。底泥については、シミュレーションにおいて、この項も入れて計算を行ったが、ほとんど影響がなかったことから無視したものである。

以上の条件でシミュレーションを行ったがその結果を図-9に示す。

BOD: 全川の自浄係数0.2(1/日)のとき、予測値と、確からしい水質とはかなりよく一致している。中流部のI, L地点では、確からしい水質が、予測値よりも上廻っている。この事は、(4)節でのべたように、I, L両地点の採水に際して、代表的検水を採水出来なかった事を示している。

被酸化態窒素: この場合は「確からしい水質」が予測値をかなり下まわっている。この事は、流入負荷量に対して、本川の被酸化態の窒素分が、流入量ほど増加していない事を示すものである。ここで注意しなければならないのは、このモデルでは、「真の全窒素」でなく「酸化されるであろう窒素分」として有機ないし、アンモニア性窒素の濃度を考えていることである。計算では、「全窒素-亜硝酸-硝酸」としているが、実

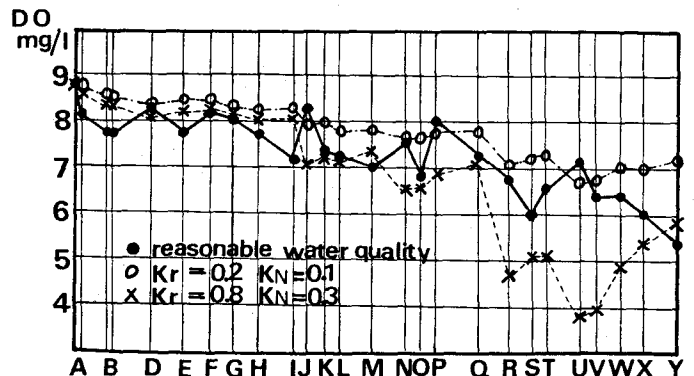
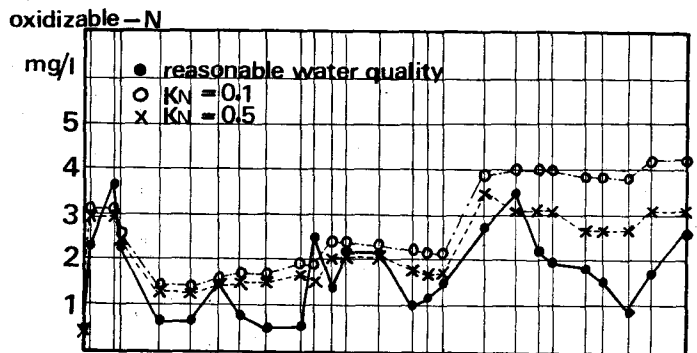
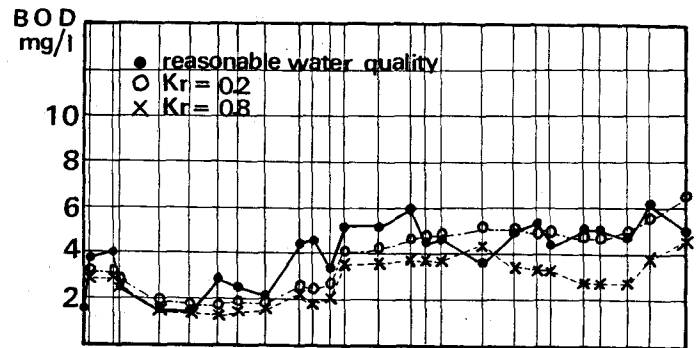


Fig. -9 Profile of simulated water quality in the Tama River

際には本川の下流部の硝酸性窒素の濃度が、 $3.0\sim 4.0\text{ mg/l}$ となっているため、本川中の酸化されるであろう窒素分が大幅に減少している形になっている。すなわち、本川中で、流入するアンモニアないし有機物のかなりの部分が、硝化されている事を意味している。実際本川の水温が、 $23\sim 24^{\circ}\text{C}$ と比較的高温であった事からも、この推論がうなずけるものである。

溶存酸素：理論的には硝化反応に伴ない、大量の酸素が消費されるが、DOのシミュレーションでみると、もし硝化反応が、自浄係数の形で、 0.3 (1/日) としても「確からしい水質」を大幅に下廻っており、酸素の面から、この硝化反応は説明することが出来ない。この事は、窒素の減少が「硝化」のみにより変化するというモデルに、無理があり、底泥その他の生物層に吸着されるというモデルを導入しなければならない事を示唆するものであろう。

今後の課題：多摩川の実態と、そこでおきている生物反応をほぼ説明出来たと考えられるが、粒子の沈降性や、物質の生物吸着等、今後解明すべき問題点も、まだ多く残されている。

本研究は、とうきゅう環境浄化財団の研究助成金により行われた。又この研究の基礎となった多量のデータは、発表者の研究室と、多くの大学の河川（水理）研究室との協同作業によりえられたものである。本研究に参加された方々に、この場をかりて御礼申し上げます。

参考文献：①市川他 水質汚濁研究発表会（1982）、②市川新 都市河川の環境科学（培風館）（1980）
③市川新 水質汚濁研究発表会（1981）