

多摩川湛水部における汚濁物質収支

The mass balance of pollutants in a pool of the Tama river

東京大学工学部 正会員 市川 新
東京大学工学部 正会員 玉井信行
東京大学大学院 学生員 ○西山智康

1. まえがき

著者らは、多摩川の実態を把握する目的で昭和50年から数回にわたり、玉川上水取水堰である羽村堰から玉川浄水場取水堰であった大田区、田園調布堰までの約40km間で、流域水質調査をおこなった。数回の現場調査を通じて、流域内に10個ほどある取水堰等による湛水部を通過すると河川水質が著しく良化するという結果を得た。そこでこのような湛水部を有する代表的な地点である国立市の四谷本宿堰を対象として、昭和53年より高い自浄機能を解明するための研究を進めてきた。これまでに約10回の現場観測を行ない、堰上流の湛水部における自浄機能の主要因は、沈降にともなう有機物除去であることがほぼ確認された。そこで次に半日、あるいは1日といったある時間内に流入出する物質総量の収支から沈降等にともなう汚濁物質の減少量を定量的に把握する目的でここに報告する現場観測が計画された。本論文では、まずこれまでの研究成果を簡単に示し、次いで今回の現場観測の内容および結果をあきらかにし、それに対する考察を加える。

2. 基礎的研究成果

研究対象である国立市の多摩川四谷本宿堰は、河口から38.3kmに位置する農業用取水堰で、可動部幅が38mの転倒堰である。毎年5月から9月の間は農業用水取水のため堰は立った形で固定されており、直下の水たたきからの高さは約1.5mである。湛水部の貯水量は20,000～30,000m³と推定され、この部分の水面幅は60～70m、長さは約400m、水深は最も深い所で2.5m程度である。四谷堰は上流側1km以上の間、他排水の流入がない。最も近い主要流入源は約3km上流の残堀川と立川下水処理場放流水である。いずれも左岸からの流入であり、堰上流約2kmの日野橋では、左岸と右岸では水質にかなりの偏差が見られるが、その後浅瀬等による混合が大きく、四谷堰付近では断面内の水質は均一と考えて差支えない。

昭和53年7月19日に基礎データの収集と既往の調査結果の確認を目的とした第1回現地調査が行なわれた。この調査では湛水部の数地点における断面形状、流速、水質が調べられた。水質については、堰に近づくにつれ、懸濁性物質の指標であるBOD、COD、濁度が減少傾向を示すのに対し、溶解性物質の指標であるアンモニア性窒素(NH₄-N)、亜硝酸性窒素(NO₂-N)、硝酸性窒素(NO₃)、電気伝導度(ELC)はほとんど変化しないという結果になり、それまでの全流域にわたる調査結果を裏づけるものであった(図-1)。その後、光合成、硝化作用、沈降性BOD等の要因が湛水部水質にどの程度影響を及ぼしているかを個々に検討した。この結果、湛水部水質に限った場合、光合成や硝化作用の影響は小さいことが判明した。一方沈降性BODに関しては興味ある結果が得られた。沈降性BOD値は原水のBODと、原水を2時間静置後、上澄水を試料とした場合のBODの差として算定される。こうして求めた実測データと、ストークスの沈降速度式(1)を用いて沈降速度を算出し、シミュレートした結果が図-2である。

$$u = gd^2(\rho_s - \rho) / 18\nu\rho \quad (1)$$

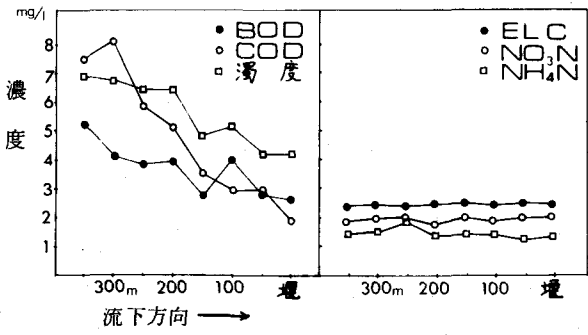


図-1 流下方向の濃度変化

ただし、 u ：沈降速度、 g ：重力加速度、 d ：粒子の平均粒径でコールターカウンターにより 20μ と実測された、 ρ_s ：粒子の平均密度で文献調査により 1.5 g/cm^3 とした、 ρ ：水の密度、 ν ：動粘性係数で実測水温 5.6°C における値とした。また現場の流速は 3.0 cm/sec と実測された。

以上の結果から湛水部の浄化機能の主要因は沈降による有機物除去効果によると推察された。しかしこれまでの考察において大きな問題が一つ残されている。それは流入水質の非定常性を度外視している点である。すなわち一水塊の水質変動を追跡する場合その水塊からの連続的なサンプリングが本来理想であるが、現実には不可能に近い。そこでやむを得ず、流入水質の定常性を仮定し、異なる水塊からサンプリングしているのが実情である。こういった測定上の誤差を少しでも軽減し、定量的な解析を行なうには、点的な測定よりも比較的長時間における汚濁物質収支、すなわち総量把握による方法も有力といえよう。本観測もこの視点に立っているが、その内容を次に示す。

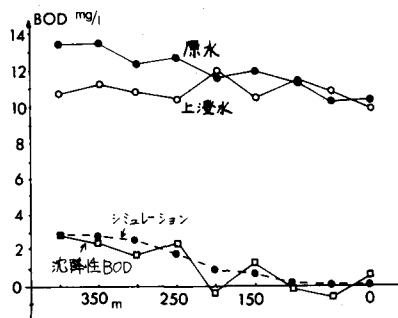


図-2 沈降性 BOD の
シミュレーション結果

3. 観測の内容

観測は54年7月25日、6時から20時にかけて行なわれた。四谷堰湛水部の上流側および下流側に検査断面を選定し、両断面における流量と水質を各々1時間毎に12時間にわたって測定し、両断面間での汚濁物質質量の変化を負荷量収支から算定することが目的である。検査断面となり得る条件は、流れが一本で流心の偏りが少ないこと、人が直接横断できる水深であること、ロープが容易にはれる川幅であること、河床に急な深みなどの危険な場所がないこと等である。本観測では四谷堰上流800mの地点を上流側断面とし、堰直下の水たたきの部分を下流側断面として選定した。

3-1. 流 況

当日までの多摩川水系の流量を図-3に示す。7月25日の調査日には、20日までの降雨の影響がほぼ完全に減衰している。しかし流量自体は依然多く、羽村堰（河口から54km）、調布堰（同13km）では過去18年間の平均豊水量を上回り、石原（同28km）では平水量と豊水量の間である。

3-2. 観測項目および観測法

観測時間は、上流側は6時から1時間毎に18時まで、下流側は8時から1時間毎に20時までである。2時間のずれは、両断面間の流下時間を推定、考慮したためである。観測項目は、断面形状、定時の流量、水位、水質である。

1) 断面形状

断面形状の測定は長さ1.5m、外径2.5cmの塩ビパイプにメジャーを接着した水深測定棒を用いる。検査断面にはったロープにそって、岸から1m間隔で水深を測定し、往復の平均値により各地点の水深を決定し、横断面図を描く。

2) 流 量

上項で得た横断面図をもとに、両検査断面を各15の部分断面に分割し、各部分断面の面積と、部分断面毎に測定した平均流速の積から各部分断面流量を求め、それらの総和として全体流量を求める。実際の現場においては、各1時間毎に、浮子であれば5m間隔の2本のロープの間を流下するのに要する時間を各部分断面

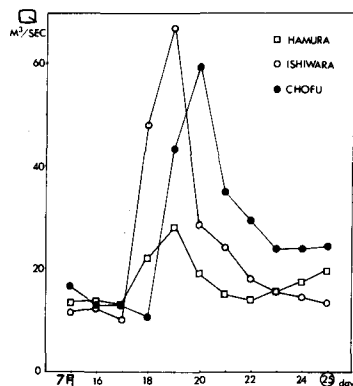


図-3 観測日までの多摩川流量

の中央で往復により4～9回測定し最大と最小を除外した2～7個の測定値を平均して表面流速を求めた。またブライス流速計であれば、1点法で部分断面毎に2～3回測定し、それらの平均値から平均流速を求めた。ブライス法による平均流速と浮子による表面流速の比の値は、更正係数 λ と呼ばれる。 λ の値は長方形断面開水路では(水面幅 B /平均水深 H)の関数とされる。物部によれば、 B/H が100以上では λ は0.83に漸近し、ほぼ一定となる。本観測の両検査断面の B/H は各々116、168であり対応する λ はいずれも0.83である。しかし本観測では、ほぼ同時刻、同位置で浮子とブライスの両者により測定したデータが多数得られたので、これにより λ を算定した所、0.74となった。以後更正係数としてはこの値を用いる。

3) 水位

上流断面では直径20cm、長さ50cmの側面に小穴のあるアクリル管を水中に固定し、上部にポイントゲージを据付けて管内の水位変動を測定した。下流断面は流速が大きくポイントゲージによる測定が困難なため、兩岸2点ずつ計4つの定点の水位を水深測定棒で測定し、それらの値から水位の変動を求めた。測定間隔は両断面とも1時間であり、測定値は流量算出の際の断面積変化を求めるのに用いた。

4) 採水および分析項目

採水は各定時に流心で行なった。分析項目は、水温、生物化学的酸素要求量(BOD)、水素イオン濃度(PH)、溶存酸素濃度(DO)、化学的酸素要求量(COD-Cr)、濁度、窒素類($\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 Kj-N)である。採水した試料は現場で必要な処置をした後、2日以内にすべての試料の分析を終了した。

4. 観測結果

4-1. 断面形状および流速分布

両検査断面と、その間200m間隔の横断面形状、および流速分布を測定した断面ではそれも合わせて示す。

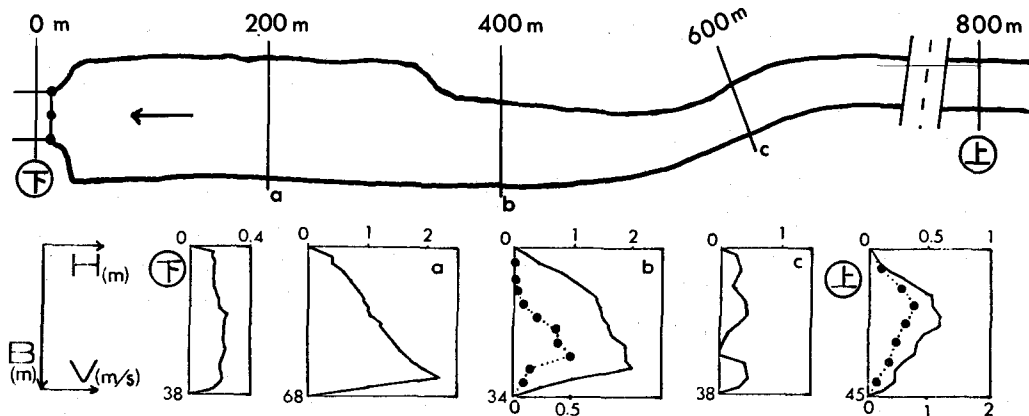


図-4 断面形状および流速分布

4-2. 単位時間流量: $Q_{n \sim n+1} \text{ m}^3/\text{hr}$

流量の測定には1回に30分～1時間を要した。したがって得られた流量は正時の記録ではないので、1時間内の総流量に換算し、これを単位時間流量とよび図-5に示す。各12時間合計では、上流側からの流入が269.3 m^3 、下流側からの流出が272.0 m^3 とよく一致し、この間での地下水等の流出入は、ほぼ無視できるといえよう。なお $Q_{n \sim n+1}$ はn時～n+1時の単位時間流量である。

4-3. 単位時間負荷量: $L_{n \sim n+1} \text{ Kg/hr}$

算出式は、 $L_{n \sim n+1} = Q_{n \sim n+1} \times C_{n \sim n+1}$ 、ただし $C_{n \sim n+1}$ はn時とn+1時の濃度測定値の平均値とする。こうして算出した各汚濁物質指標の単位時間負荷量は紙面の関係で割愛するが、おもな指標については図6に示す。ただし水温は負荷量ではなくての単位である。またBOD負荷量のデータは今後の考察に関係する

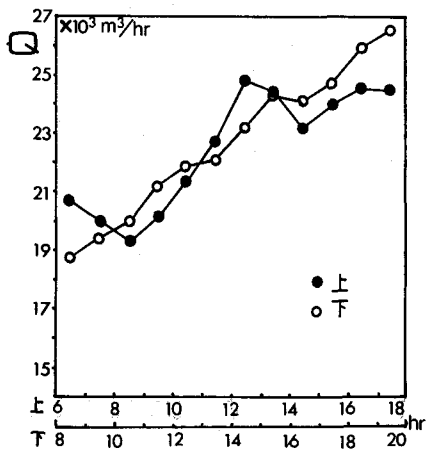


図-5 単位時間流量

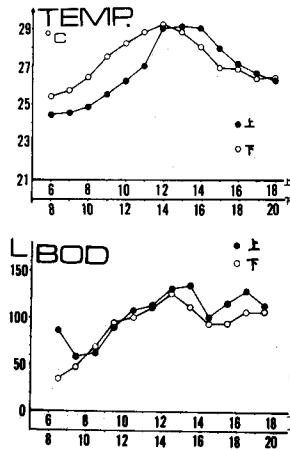


図-6 単位時間負荷量

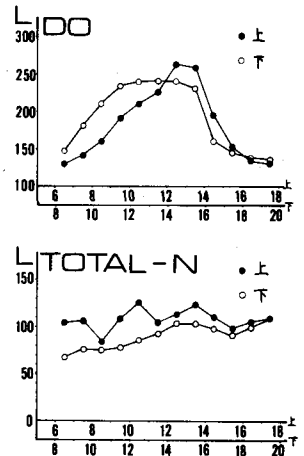


表-1 単位時間BOD負荷量

ので、数値を表-1に示す。

4-4. 平均流下時間Tの推定

53年7月に両検査断面間50m間隔で横断面測定を行ない、検査断面間の各水理量が次のように求められた。

$$\text{水路容量 } V = 3.68 \times 10^4 \text{ m}^3$$

$$\text{水面積 } A = 4.04 \times 10^4 \text{ m}^2$$

$$\text{平均水深 } H = 0.91 \text{ m}$$

調査日の平均流量は実測値より $2.26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hr}$ となった。したがって

$$T = 3.68 \times 10^4 / 2.26 \times 10^4 = 1.63 \text{ hr}$$

4-5. 総括自浄係数kr(1/日)の算出

河川の自浄機能を定量的に表現するには、測定値を何らかのモデル化した理論式に適用して考察することが望ましい。最も一般的モデルとして、Streeter-Phelpsモデルがあげられる。このモデルでは、流下にしたがう2地点A、BにおけるBOD負荷量がそれぞれ L_A 、 L_B とするなら、その間のBOD負荷量の減少が次式にしたがうと仮定する。

$$L_A - L_B = L_A (1 - 10^{-krT}) \quad (2)$$

(2)を変形すると(3)となる。

$$kr = (1/T) \log (L_A / L_B) \quad (3)$$

(3)より本観測におけるkrを求めると

$$kr = (24/1.63) \log (1239/1093) = 0.802 (1/\text{日})$$

時刻 (hr)	上流側	下流側
6~7	86.1	—
7~8	56.6	—
8~9	61.7	33.7
9~10	88.3	46.1
10~11	108.4	69.4
11~12	112.9	92.5
12~13	131.1	99.5
13~14	134.8	112.2
14~15	100.8	126.1
15~16	115.5	111.0
16~17	128.5	93.5
17~18	113.8	94.5
18~19	—	106.8
19~20	—	108.0
合計	1239Kg	1093Kg

5. 調査結果に関する考察

5-1. 沈降性BODの割合

河川中のBOD源は、沈降性と溶解性に大別される。本観測結果から沈降性BODが全BODに占める割合を求める。

昭和54年2月に、四谷堰湛水部数地点においてコールターカウンターによる粒径分布調査を行ない、粒径分布曲線をえた。この累積曲線から理想沈殿池モデルを用いて水面積負荷 Q/A と粒子の除去率 X の関係が

定まる³⁾。手順は、まず粒子の粒径分布よりストークスの式を用いて沈降速度の累積曲線を描く。次にある水面積負荷 v_1 を仮定する。 $v_1 = (Q/A)_1$ であり速度の次元を有する。理想沈殿池モデルでは沈降速度が v_1 以上の粒子はすべて除去され、 v_1 以下の粒子は、それぞれの沈降速度と v_1 の比、に等しい割合で除去されると考える。こうして v_1 に対する粒子の除去率 X が決定する。次に同様に $v_2, v_3, \dots$ を決め、それに対応する $X_2, X_3, \dots$

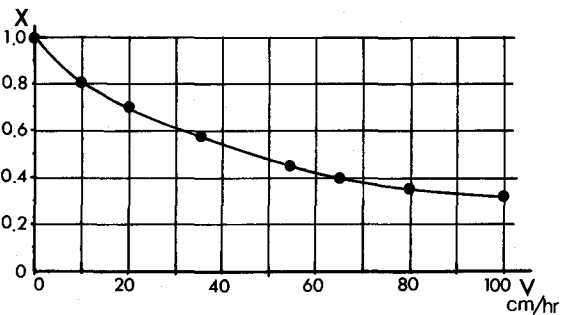


図-7 水面積負荷と除去率

を求めてプロットすれば、図-7がえられる。本観測時は水面積負荷 $v = 2.26 \times 10^4 / 4.04 \times 10^4 = 0.56 \text{ m/hr}$ 、図-7より粒子の除去率 $X = 0.44$ となる。一方BOD負荷量の両断面間の減少率は $(1239 - 1093) / 1239 = 0.12$ である。滞留時間が短かいのでBOD負荷量の減少は、そのほとんどが沈降によると仮定すれば、沈降性BODが全BODに占める割合が算出でき、 $0.12 / 0.44 = 0.27$ となる。この値は従来報告されてきた値とほぼ一致する。⁴⁾

5-2. 横断面内の流速偏差を考慮したモデル

前頁4-5で算定した kr は、四谷堰での実測値であるが、同じ湛水部においても流速、水深等の流況が異なると kr 値も異なることが予想される。四谷堰湛水部においても400m上流ではかなりの流速偏差が見られることから、図-8のように流れを流心付近の「速流部」と周辺の「遅流部」に分割し、それぞれの部分での kr を求めてみる。以後添字1は速流部、2は遅流部をあらわす。ここに、 L_1, L_2 : 上流断面負荷量、 L'_1, L'_2 : 下流断面負荷量(いずれもBOD)、 k_1, k_2 : 総括自浄係数、 t_1, t_2 : 流下時間、 α : Q_1/Q の値でグラフより0.62となった、 $\bar{h}_1, \bar{h}_2$: 各流路の平均水深で、 $\bar{h}_1, \bar{h}_2$ の値は便宜的に堰上流400mでの値1.34で代用する、 v : 水面積負荷で Q/A と同値、 V_1, V_2 : 水路容量、

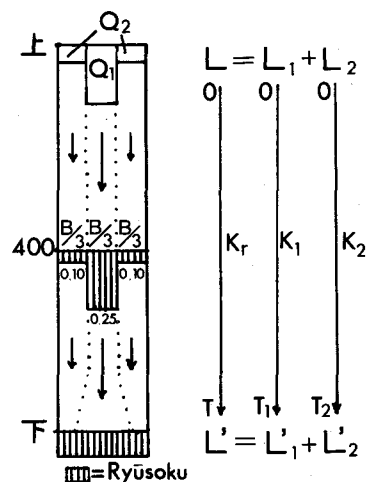


図-8 モデルの説明

1) 基本式

$$Q_1 + Q_2 = Q, \quad L_1 + L_2 = L, \quad L'_1 + L'_2 = L'$$

$$Q_2 / Q_1 = L_2 / L_1 = (1 - \alpha) / \alpha$$

$$T = \alpha t_1 + (1 - \alpha) t_2 \quad (4)$$

$$v_1 t_1 = (Q_1 / A_1) (V_1 / Q_1) = \bar{h}_1 \quad v_2 t_2 = \bar{h}_2 \quad (5)$$

$$k_1 = (1 / t_1) \log (L_1 / L'_1) \quad k_2 = (1 / t_2) \log (L_2 / L'_2) \quad (6)$$

2) v_1 と v_2 の関係

$$(5) \text{より} \quad v_1 / v_2 = (\bar{h}_1 / \bar{h}_2) (t_2 / t_1) = 1.34 a \quad (7) \quad \text{ただし} \quad a = t_2 / t_1 \quad (8)$$

a は t_2 と t_1 の比の値であり一定範囲を動く変数である、このモデルの基礎となった堰上流400mでの流速分布がそのまま維持されたとすれば、速流部と遅流部の平均流速の比より $a = 2.5$ と求められる。しかし数断面での流速分布調査から流下にしたい流速分布は一樣に近づくことが確認された。これより a の範囲は

$$1 \leq a \leq 2.5 \quad (9)$$

と仮定される。

また v_1 と v_2 にはさらに別個の関係が存在する。それはBODの総量収支から導かれる関係で、求め方は、

i) v_1 を仮定する、ii) 図-7より X_1 を求める、iii) $L'_1 = L_1 (1 - 0.27 X_1)$ より L'_1 を求める。0.27は5-1で求めた沈降性BODの割合である、iv) $L'_2 = L' - L'_1$ より L'_2 を求める、v) L'_2 に対応する X_2 、

さらには v_2 を求める。こうして得た v_1 と v_2 の関係が図-9に示される。

3) k_1 、 k_2 の決定

図-9と式(7)より a を与えれば k_1 、 k_2 が決定する。すなわち
i) (9)にしたがうある a を仮定する、ii) (4)、(8)より t_1 、 t_2 を決定する、iii) 図-9と(7)より v_1 、 v_2 を決定する、iv) 前項に示した要領で L_1' 、 L_2' を決定する。v) (6)により k_1 、 k_2 を決定する。こうしてさまざまな a に対して算出した k_1 、 k_2 、BOD負荷量の残存率 Y_1 、 Y_2 、下流断面でのBOD濃度 C_1 、 C_2 をまとめて表-2に示す。これによると $\bar{b}_1 > \bar{b}_2$ と仮定したため $t_1 = t_2$ でも各 k 、 Y 、 C の値は異なる。また k は t と Y の関数であるため、 Y や C に比べ、かなりセンシティブな定数であることがうかがえる。さらにまた新たな仮定として、下流断面では流速と水位が一樣であり、同時に両流部の水面積が台形の面積として算出できるとすれば、 a 値を推定することができ、結果は1.78であった。

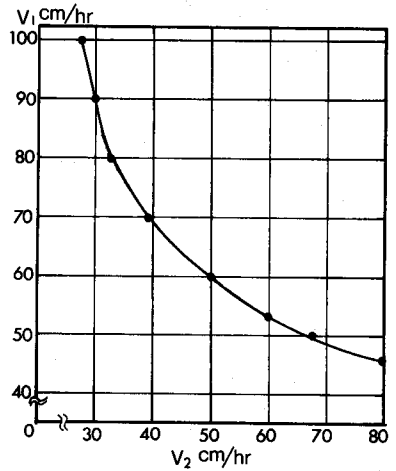


図-9 v_1 と v_2 の関係

表-2. モデルを用いた計算結果

6. 結論および今後の課題

本観測を通じて得られた結果をまとめると以下の通りである。

1) 単位時間負荷量は日間変動の幅が大きく、点的な測定で全体を把握することは困難である。今後はさらに流量、水質等の時間的変動パターンをも考慮したダイナミックな解析が望ましいと考える。

2) 四谷堰湛水部の総括自浄係数は0.802(1/日)となった。また沈降性BODが全BODに占める割合を減少量が沈降によると仮定して算出したところ0.27となった。

3) モデルを用いた解析によると、速流部と遅流部では、水理的条件により総括自浄係数は0.74~0.90まで変動するのに対し、残存率や濃度の変動は比較的小さく、濃度は流心付近が周辺より高い傾向がある。

なお本観測を行なうにあたっては、東大土木工学科応用水理研究室、都市工学科衛生工学分野の職員、院生、学部生の方々に現地作業とデータ整理の両面にわたり多大な助力をいただいた、心より感謝の意を表す次第である。なお、本研究は文部省科学研究費総合研究(A)による成果の一部である。

〔参考文献〕

- 1) Stanley & Swift: Marine Sediment Transport and Environmental Management, (1976)
- 2) 本間、安芸: 物部水理学 (1962)
- 3) Metcalf & Eddy, Inc.: Waste Water Engineering, (1972)
- 4) Velz: Applied Stream Sanitation, (1970)