

河川の自浄作用について

— 市野川 —

大木 貞幸 杉崎 三男 須貝 敏英

要 旨

荒川水系の市野川中流域を対象に、「自浄作用」に関する調査を行った。秋期と春期の2回の通日調査の結果、(1)調査区間（羽下橋－天神橋 約4.0km）における溶存態BODの自浄係数 k は0.80－1.08と大きかったが、懸濁態成分ではいずれも負の値を示した。(2)溶存酸素の連続測定によって推定した総生産量、全呼吸量の比(PG/R比)は日間値として0.79－0.89、日間最大で2.17であった。また、(3)冬期の河床付着微生物現存量調査の結果、最大値はクロロフィル a 量として249mg / m^2 と極めて大きいなど、付着藻類による一次生産が優勢であることがわかった。(4) 別離藻類の、強熱減量で表される有機物濃度への寄与率は調査区間において年間で34%、懸濁態COD負荷量としては年間約2.7tであると推定された。

1 はじめに

河川は、微生物などによる生産と呼吸、流水、河床における物理的・化学的作用が組み合わさった複雑な生態系であり、しかもそれらの作用は日変動と季節変動を繰り返している。河川の「自浄作用」の推定は、それらの現象全体の近似値を求めることであり、種々の角度からのアプローチが必要である。

今回の調査では、荒川水系の市野川を対象に、通年調査、一定区間における汚濁負荷量、溶存酸素収支の通日調査等を行い、いくつかの知見を得たので報告する。

2 流域の概況

市野川は、寄居町の丘陵地帯に水源をもつ、流路延長約34.0km、流域面積約146.6km²の中河川であり、川島町内で荒川本川に合流している。上流部は丘陵、田畑、中流部には市街地が密集し、下流部は水田地帯になっている（図1参照）。下流部には農業取水用の堰があり、かんがい期には流れが停滞し、昭和61年7月の調査時には、市の川橋下流付近で緑色のマット状に生長した*Euglena sp.*の群集が観察された。

流域の下水道普及率は19.2%、BOD排出負荷量の84.5%が生活系である¹⁾。

最近5年のBOD濃度年平均値を観測地点の天神橋で見ると、4.6－7.3mg / l であり、環境基準(B類型基準値3mg / l)を連続して超過している²⁾。

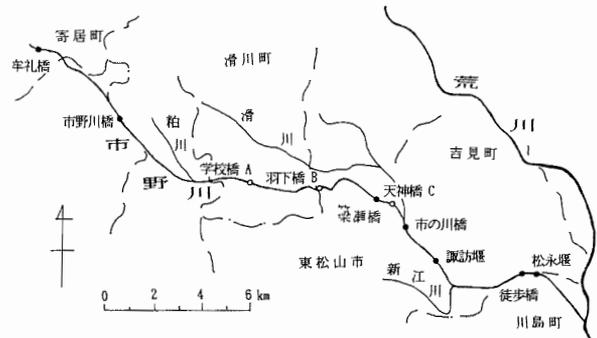


図1 市野川流域概略図

3 調査方法

3・1 調査地点

調査地点は、図1に示すように学校橋（荒川合流点から17.72km、地点A）、羽下橋（同15.07km、地点B）及び天神橋（同11.41km、地点C）であり、通日調査は

区間B-C(4020m)で行った。B-C間には、中小10以上の樋管・排水路が流入しており、いずれも流量は少なく時間変動が大きい。

A-C間の平均水面幅と平均水深は季節変動が大きく、低水位時でそれぞれ4-12m、10cm程度である。河床は小礫、細砂、一部泥岩である。

3・2 現地調査

3・2・1 通年調査

観測地点の地点Cのほか、A及びBで昭和61年5月から翌年3月にかけて、概ね月一回採水、流量観測を行った。

3・2・2 通日調査

61年10月28-29日と62年3月16-17日に地点B、Cで通日調査を行った。

採水、流量観測は、区間B-Cの推定流下時間分ずらして、両地点で3-4時間毎に行い、また、DO(溶存酸素)メーターを用いてDO及び水温を連続的(10月は1時間毎)に測定した。同時に、Aでは積算照度、BではpHを同様に測定した。

10月の調査日は両日とも曇り、3月は16日晴れ、17日曇り、調査前1週間の降水量はそれぞれ1mm、5-19mm(寄居・鴻巣)であった³⁾。

3・2・3 河床付着微生物現存量調査

62年1月9日-2月23日に、地点A、B及びCで行った。調査方法は、前報¹⁾に準じた。期間中の降水量は37-47mmであり、天候はやや不安定であった。

3・3 分析項目及び方法

分析項目及び方法は、次の項目を除き、前報と同じである。

NO₂-N ; N-(1-naphthyl)ethylenediamine-Sulfanylamyde法

NO₃-N ; サリチル酸ナトリウム法(衛生試験法注解1980)

クロロフィルa分解率 ; Lorenzen法

4 調査結果

4・1 流下時間及び流量収支

流下時間の推定は、前報と同じマンギングの等流モデルによった。区間B-Cにおける水理諸元⁵⁾と推定流下時間を表1、2に示す。3月16日に梁瀬橋-B間(975

m)で行った浮子法による流下時間は58分、同区間の推定流下時間は53分であり、概ね一致していた。

表1 水理諸元

		区間 B-C
区 間 距 離	m	4 0 2 0
平 均 水 面 幅	m	9.2 3
平 均 河 床 勾 配	m/m	3.0 2 × 10 ⁻³
粗 度 係 数		0.0 3 5
河 床 面 積	m ²	3.1 7 × 1 0 ⁴

表2 推定流下時間 他

区間B-C	10/28-29	3/16-17
平 均 流 量 m ³ /sec	0.1 9 4	0.2 5 3
平 均 流 速 m/sec	0.2 8 0	0.3 1 1
流 下 時 間 m i n	2 3 9	2 1 5
平 均 水 深 m	0.0 7 5	0.0 8 8

図2は、10月及び3月の通日調査時の両地点の流量日変動を、推定流下時間分ずらして重ねたものである。区間B-Cでは、前述のとおり、樋管等からの流入量の実測が困難であるため、自浄係数の算定及びDO収支の推定における「night equations」の設定は、流況の最も安定した22時(10月)、23時(3月)付近で行った。

4・2 自浄係数 k

地点B、Cにおける通年調査の水質分析結果を別表1に示す。年間を通じての特徴は、DOがほぼ飽和から過飽和の状態にあること、pHが中性-アルカリ性域(7.3-9.2)にあること、冬期のBOD濃度が高いこと、流量の変動が著しいことなどである。T-N、T-Pの年平均値は、それぞれ4.6、0.22mg/l(地点B)、5.2、0.23mg/l(地点C)である。また、通日調査時におけるT-N中に占めるNO₃-Nの比率は、地点B、Cの平均で72.3%(10月)、58.0%(3月)と高く、豊富なDOにより硝化反応が進んでいることがわかる。

10月の通日調査時の、両地点のBOD負荷量の日変動を図3に示す。いずれも流入負荷の影響は顕著でないが、下流のCでは、生活排水の影響がわずかに現れているものと考えられる。

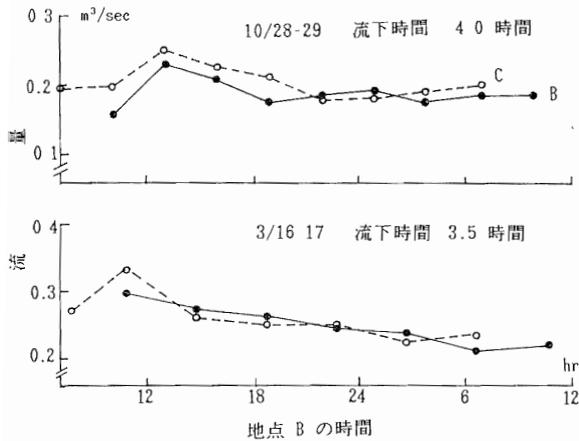


図2 流量日変動

(地点 B, C ; s61.10/28-29, 62.3/16-17)

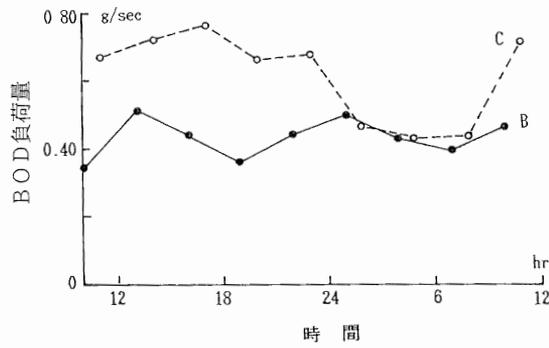


図3 BOD負荷量日変動

(地点 B, C ; s61.10/28-29)

前報と同様の考え方で、2回の通日調査時の有機汚濁物質濃度について求めた k を、浄化残率とともに表3に示す。10月はB 22時、C 2時、3月はB 23時、C 2時30分のものである。表中、s-BOD等は溶存態、p-BOD等は懸濁態成分を表す。2回ともs-BODの k は0.80-1.08と大きいですが、BODについては懸濁成分の増加による影響により大きくくい違っている。懸濁成分については、すべて負の値になっており、この区間で河床堆積物の巻き上げ等が起こっていることが推定される。

3月の通日調査時の各検体について、実験室(20°C 静置条件)で求めた脱酸素係数 k_1 (Thomas法⁶⁾による)の平均値はB 0.18、C 0.30であった。

表3 自浄係数 k

(区間B-C; s61.10/28-29, 62.3/16-17)

	BOD	s BOD	p BOD	COD	s COD	p COD	SS	II	
10/28-29	k	0.18	1.08	2.66	0.10	0.21	0.89	1.03	0.71
	浄化残率	1.07	0.66	2.77	0.96	0.92	1.40	1.48	1.31
3/16-17	k	0.12	0.80	0.38	0.14	0.24	0.21	0.52	0.31
	浄化残率	0.96	0.76	1.13	0.95	0.92	1.07	1.19	1.11

4.3 溶存酸素収支

一定の河川区間のDOの変動は、その区間の「定常状態」を仮定すれば、下記の微分方程式で表すことができる。

$$dC/dt = P(t) - R + K_2 \cdot (C_s - C)$$

C はDO濃度、 t は時間、 $P(t)$ は藻類または水生植物による t の関数としての一次生産量(光合成量)、 R は微生物などによる呼吸量及びその他の化学的な酸素消費量をふくめた全呼吸量、 K_2 は再ばっ気係数、 C_s は飽和DO濃度である。このモデルにもとづく、DOの連続測定によるDO収支の推定方法については、Simonsenら⁷⁾によって詳細に検討され、また最近では馬場ら⁸⁾、亀井ら⁹⁾によって実験水路あるいは実河川に適用されている。Simonsenらによれば、いずれの方法⁷⁾を用いる場合も、(1)区間を通じて水理諸量が概ね一定であること、(2)流量の変化がないかあるいはほとんどないこと、(3)地下水の流入を無視しうること、(4)水深方向及び流下方向の混合が完全であることを前提とする。これらの方法のうち、上下流の2地点でのDOと水温の連続測定による方法(twin curve method)は、流下時間を考慮した、2地点における実質的な差の測定からの推定であり、実河川への適用に適していると考えられる。

「twin curve method」による生産量等の推定方法の概要は別表2のとおりである。

図4、5に、10月の、地点B、CにおけるDOと水温、pH及び積算照度の連続測定結果を示す。10月及び3月とも、DO変動の幅は下流のCのほうが大きい。また、地点CにおけるpH変動は、DO変化に数時間遅れて追隨していることがわかる。

図6は、これらから算定した、10月の区間B-Cにおける総生産量 $P(t)$ と全呼吸量 $R(t)$ の日変動である。推定流下時間は4.0時間(10月)、3.5時間(3月)であり、時間 t は地点Bの時間に流下時間の1/2を加えたもの、積算照度はそれぞれの流下時間分を積算したものである。 $P(t)=0$ として、20°Cにおける再ばっ

気係数 $k_2(20)$ 及び全呼吸量 $R(20)$ を求めるための「night equations」は、Bの時間で、10月は22時と23時、3月は23時と24時のものとした。

以上から求まる総生産量と全呼吸量の、単位水塊及び単位河床面積当たりの日間値、 P_G 、 R を表4に示す。

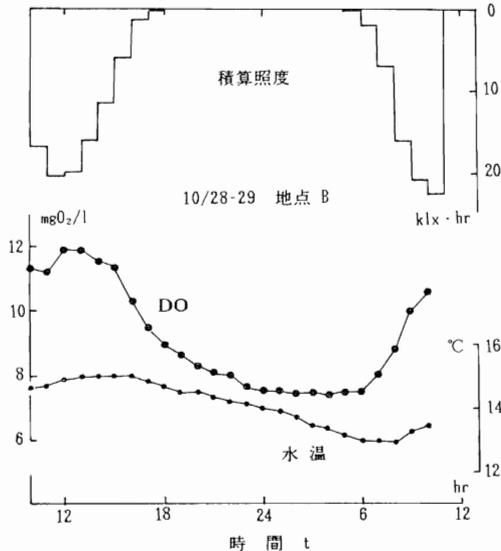


図4 DO、水温、積算照度の日変動
(地点B; s61.10/28-29)

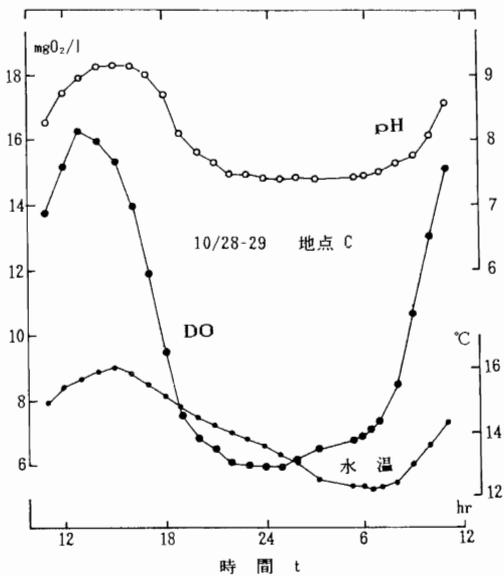


図5 DO、水温、pHの日変動
(地点C; s61.10/28-29)

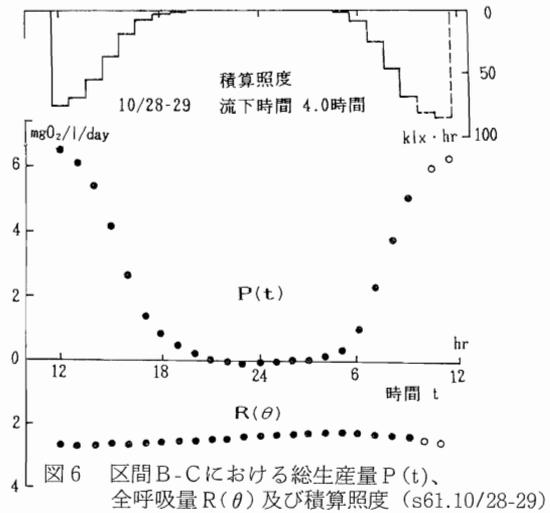


図6 区間B-Cにおける総生産量 $P(t)$ 、
全呼吸量 $R(\theta)$ 及び積算照度 (s61.10/28-29)

表4 総生産量 P 及び全呼吸量 R (日間値)

	10/28-29	3/16-17	
総生産量 P_G	$mgO_2/l/day$	52.6	40.6
	$gO_2/m^2/day$	27.8	28.0
全呼吸量 R	$mgO_2/l/day$	58.9	51.3
	$gO_2/m^2/day$	31.1	35.4
20°Cにおける			
全呼吸量 $R(20)$	$mgO_2/l/day$	87.8	105.0
20°Cにおける			
再ばつ気係数 $k_2(20)$	$/day$	8.0	6.8
総積算照度	$klx \cdot hr$	145.9	452.8

4・4 河床付着微生物現存量

地点A、B及びCで62年1月9日-2月23日間にに行った調査結果は、図7に示すとおりである。期間中の各地点の表面流速、水深及び水温は表5のとおりである。AとBでは、38日目(2/16)に乾燥重量、強熱減量(IL)、クロロフィルa(chl.a)ともピークに達し、その後減少しているが、地点Cではやや不安定である。その理由としては、Cの流速が他と比べてやや速いことがあげられる。chl.aの分解率をみると、地点により変動が大きいが、45日目(2/23)に最大値を示し、特にA、Bではchl.a、ILのピーク後、急速に分解率が高まっていることがわかる。乾燥重量、IL、chl.aの最大値は、B、38日目の82.2g/m²、19.8g/m²、249mg/m²であり、冬期のものとしては極めて大きい。

各地点のA.I. (独立栄養指数¹⁰⁾ IL/chl.a)は表6のとおりであり、河床付着物中に占める藻類以外の有機物の比率が、下流地点に向って高まっていることが推定される。

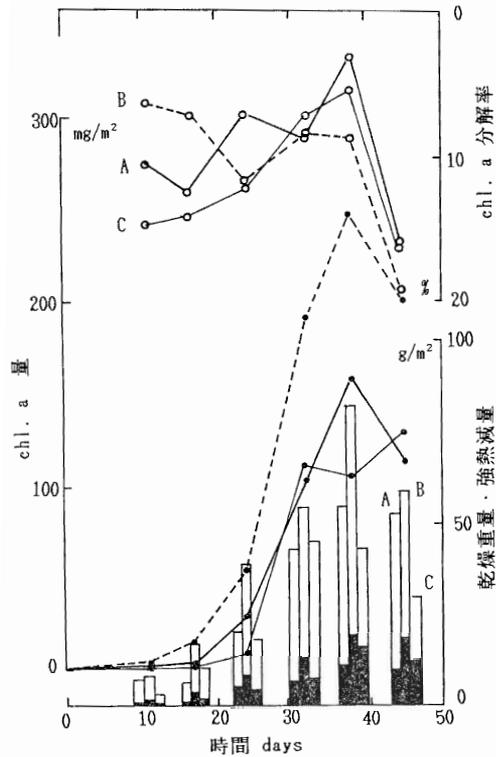


図7 河床付着微生物の乾燥重量、強熱減量クロロフィルa (chl.a)及びchl.a分解率の経時変化(地点A,B,C;s62.1/9-2/23)

5 考察

(1) 河床付着藻類による生産量を一次的に制限する要因は、日射量、水温などであると言われている。10月と3月の調査時の、総生産量 $P(t)$ ($\text{mg O}_2/\text{l/day}$)と積算照度 $Lt(\text{klx} \cdot \text{hr})$ の一次回帰式は次のとおりである。

$$10月 \quad P(t) = 0.0847 \cdot Lt + 0.265 (n=22, r=0.983)$$

$$3月 \quad P(t) = 0.0190 \cdot Lt + 0.263 (n=22, r=0.964)$$

10月の調査時は終日曇りであったが、河床の藻類の表面には酸素の泡が付着しているのが観察され、実際の P_G はさらに大きかったことが考えられる。3月は、冬期末の付着藻類の剥離期の後に当たったため、晴天にもかかわらず、 P_G は11月より小さかった。水域の微生物群集の構成の指標である P_G/R 比は、それぞれ0.89、0.79である。明暗ビン法による P_G の推定がいれば瞬時値であるのに対し、本調査で求めたそれは1日の合計値であり、河川における生産と呼吸のバランスをより正確に反映していると考えられる。なお、3

表5 河床付着微生物現存量調査条件

(地点A,B,C ; s62.1/9-2/23)

	A	B	C
流速 m/sec	0.22-0.38	0.12-0.25	0.43-0.53
水深 cm	12-15	14-17	12-18
水温 °C	3.2-9.8	2.6-7.8	2.8-11.6

表6 独立栄養指数A.I.

(地点A,B,C ; s62.1/9-2/23)

	2/16	データの1次回帰式 によるもの
A	70	63 ($r=0.953$)
B	79	70 ($r=0.969$)
C	150	104 ($r=0.943$)

月の調査日の $P(t)$ の最大時における P_G/R 比は、2.17、河床付着藻類による単位chl.a当たりの生産量 $P_{Gmax}/\text{chl.a mass}$ は、 $9.67 \text{ mg O}_2 / \text{mg chl.a} \cdot \text{hr}$ であった。いずれも、付着藻類を明暗ビン中に懸濁させて行った前報の小畔川の調査結果に匹敵し、この区間の富栄養化が著しいことを示している。

(2) 再ばっ気係数 k_2 の、水理諸量と液面平衡理論による推定式は、数多く提案されている^{7) 11)}。それらによる計算結果は、表7のとおりである(推定式は別表3に示す)。本調査で求めた値と推定値(計算値)は比較的良好に一致しているが、基礎となる水理諸量自体、一種の推定値である場合が多く、照合の繰り返しが必要であろう。

表7 再ばっ気係数 k_2 推定結果

(区間B,C, 20%, 底10)

	Twin curve method	Tackston & Krenkel	Law	Tsivoglow & Wallace	村上
10/28 29	8.0	10.7	8.3	5.6	3.0
3/16 17	6.8	9.9	7.6	6.4	2.7

(3) 前述のDO収支モデルは、河川中のDO収支を一次生産と全呼吸、及び再ばっ気だけによって説明しようとするものであり、必ずいくつかの仮定を前提する。これらのうち、実河川への適用においても最も問題になるのは、流量の変動であると考えられる。本調査における流量の日変動の変動係数は、10月10.3%、3月11.5%、推定流入分の日平均流量に対する比は、

平均で7.9%(10月)、1.3%(3月)、最大22.8%(10月)、13.8%(3月)と無視しえず、推定値に誤差を与えていると思われる。

流量の時間的変動に対してはDOを「量」として扱うことによって、空間的変動(流出入分)に対してはモデルの変更または区間の細分化によって精度を上げることができると考えられる。

(4) 本調査区間のような、水深の浅い中小河川における流水中のchl.aは、そのほとんどが河床付着藻類が剥離したものであると考えられる。そこで、流水中の剥離藻体のIL/chl.a比が付着藻類のIL/chl.a比、つまりA.I.に等しいと仮定すれば、ILで表される流水中の有機物中に占める付着藻類寄与分の比率を推定することができる。表8は、本調査における地点B、CのA.I.とchl.a及びILの年間75%非超過確率値及び10月と3月の調査日の日平均値から、区間B-Cに関して付着藻類起因のILの構成比を求めたものである。このことから、有機汚濁物質濃度が低い10月には、その懸濁態成分のほとんどが剥離した付着藻類の寄与によるものであったと考えられる。また、表8の年間の構成比、ILの年間の75%非超過確率値、流量の年間の25%非超過確率値及びIL-p-CODの年間値の一次回帰式($p\text{-COD}=0.395 \cdot \text{IL}-0.152$ $n=24$ $r=0.748$)から求まる、B-C間における付着藻類起因のp-CODの年間負荷量は2.67tである。

表8 剥離藻類のIL(強熱減量)への寄与(区間B-C)

	構成比 %
年 間	3 4.3
10/28-29	8 6.6
3/16-17	3 1.8

6 結 び

(1) 河川の自浄作用のみかけ上の指標である、実測の自浄係数kは、調査時の汚濁負荷、河況などによって大きく異なることが多く、「平均的」な値を求めることは難しい。実験室条件での脱酸素係数 k_1 、年間の測定データなどとの照合を検討する必要がある。

(2) 本調査におけるいずれの結果も、この区間の一次生産の優勢さを表している。また、微生物群集の呼吸・分解活動も活発であると考えられる。このことは、河川の「自浄作用」の評価に当たっては、有機物生産を考慮することが必須であること示す。特に、剥離藻体の有機汚濁への影響は、季節によっては極めて大きく、外部からの汚濁負荷だけによって「予測」を行うことは危険である。さらに、一次生産の優勢さも、微生物群集の生命活動などの動的な均衡にもとづくものであり、外部からの汚濁負荷の増加がそのバランスをくずし、分解・呼吸が優勢な、より悪化した環境に転化することがあることも勘案する必要がある。

本調査における、日間のPg/R比0.8-0.9は、市野川が、ちょうどそのような均衡の上にあることを示唆しているように思える。

文 献

- 1) 埼玉県環境部：水質環境情報システム, 1985.
- 2) 埼玉県環境部：公共用水域水質測定結果, 1986.
- 3) 熊谷地方気象台：埼玉県気象月報
- 4) 大木貞幸ら：河川の自浄作用について - 小群川 - 埼玉県公害センター年報, [13], 77~86, 1986.
- 5) 埼玉県東松山土木事務所：市野川水理解析報告書, 1985.
- 6) H.A.Thomas, Jr. : Graphical Determination of BOD Curve Constants, Water & Sewage Works, 97, 123, 1950.
- 7) J.F.Simonsen and Harremões : Oxygen and pH Fluctuations in Rivers, Water Research, 12, 477~489, 1978.
- 8) 馬場洋二ら：河床付着微生物等による都市河川の水質浄化工法に関する研究, 環境保全研究成果集(II), 111-1~23, 1981.
- 9) 亀元宏宣・小倉紀雄：都市河川の自浄作用, 第20回水質汚濁学会講演集, 99, 1986.
- 10) APHA-AWWA-WPCF : STANDARD METHODS 15th Ed., 968pp, 1980.
- 11) 土木学会：水理公式集, 465pp, 1985.

別表1 通年調査結果(地点B,C)

(単位 ㎎/ℓ)

	B 羽 橋													C 人 神 橋												
	5/9	5/22	6/4	7/31	10/3	10/28	11/7	12/8	87 1/9	2/2	3/2	3/16	5/9	5/22	6/4	7/31	10/3	10/28	11/7	12/8	87 1/9	2/2	3/2	3/16		
採水時刻	14:40	13:40	14:30	11:15	14:30	10:20	14:00	13:30	13:55	14:00	13:45	11:00	11:20	14:30	11:25	14:50	11:40	11:00	11:45	11:55	11:25	11:20	11:15	11:20		
水温(℃)	240	225	236	310	221	140	137	75	60	28	71	93	225	230	246	340	220	155	128	86	65	28	68	101		
pH	868	782	852	854	800	797	829	803	788	790	821	814	805	774	807	914	783	806	815	799	757	730	798	844		
EC(μS/cm)	322	291	323	372	295	421	454	461	460	460	427	417	336	290	309	374	291	409	412	477	452	481	452	413		
SS(㎎/ℓ)	139	169	82	34	166	24	39	51	45	59	87	76	108	219	80	63	131	43	35	104	47	74	99	120		
IL	44	36	25	24	44	15	26	35	27	42	40	33	48	48	30	28	42	34	26	47	37	46	55	59		
DO	104	-	96	118	85	110	119	123	129	134	153	133	102	-	79	127	89	131	143	141	126	116	159	162		
BOD	34	21	27	23	31	22	33	62	41	66	59	42	48	18	36	33	41	34	49	81	70	97	100	72		
COD	57	51	57	60	58	54	60	71	63	78	83	74	72	51	61	64	69	60	63	85	72	93	101	90		
S-COD	47	40	48	50	42	45	57	57	58	66	67	54	58	37	50	58	43	51	55	68	62	78	83	62		
T-P	015	006	013	017	012	022	026	036	026	034	030	021	016	006	014	019	014	014	024	033	026	039	037	029		
T-N	44	36	39	33	38	51	51	-	61	56	59	46	44	36	48	28	43	42	55	59	67	78	64	50		
Cl ⁻	195	157	197	263	195	235	358	317	381	333	336	305	192	156	187	291	155	259	289	374	385	489	374	309		
Chl a (μg/ℓ)	65	40	94	212	71	39	60	305	37	66	104	79	70	37	74	166	103	149	126	95	31	103	96	122		
流量(ml/sec)	0861	1414	0660	0152	1129	0152	0199	0138	0169	0155	0133	0291	0880	8843	0795	0253	1782	0196	0203	0127	0268	0177	0173	0261		

別表2 Twin curve method による生産量等推定方法 (文献7)による。

基本式

$$dC/dt = Q_1 = P(L) - R(20) + K_2(20) + 0.241^{t-20} (C_s(\theta_t) - C_t)$$

ここで

$$Q_1 = (C_x - C_t) / Th, \quad t_1 = t_1 + Th/2, \quad \theta_t = (\theta_1 + \theta_2) / 2, \quad C_t = (C_1 + C_2) / 2$$

記号

C₁ C₂ 上流及び下流地点のDO濃度(mg/l) C_s(θ_t) 水温θ_tにおける飽和DO濃度(mg/l), t₁, t₂ 上流及び下流地点の時間, Th 流下時間(days) θ₁, θ₂ 上流及び下流地点の水温(°C), P(t), 時間 t における総生産量(mgO₂/l/day), R(20), 20°Cにおける全呼吸量(mgO₂/l/day) K₂(20) 20°Cにおける再ばっ気係数(/day)

推定方法

- 1) 区間の上下流地点でのDO及び水温の日変動の測定
- 2) 測定データの基本式への代入
- 3) 2ないし複数の night equations (P(t)=0) の設定, K₂(20)及びR(20)の決定
- 4) 基本式による、測定時間毎のP(t)の算定
- 5) P(t)の計算値の合計による日間総生産量の算定

別表3 再ばっ気係数k₂(温度20°C)推定式(文献7,11)による。

- 1) Tackston & Krenkel

$$K_2 = 0.000288 \left(1 + \sqrt{\frac{U}{gH}} \right) \frac{\sqrt{Sg}}{H} \quad (K_2: \text{底e./sec})$$
- 2) Law

$$\frac{K_2 \cdot H}{U} \cdot 10^5 = 50 \frac{\sqrt{Sg}}{U} - 2.5 \quad (K_2: \text{底e./sec})$$
- 3) Tsvogiolou & Wallace

$$K_2 = c \cdot \left(\frac{\Delta h}{Th} \right) \quad (K_2: \text{底e./day})$$
- 4) 村上

$$k_2 = \frac{22.56 \cdot n^2 \cdot U^{0.6}}{H^{0.8}} \quad (k_2: \text{底10./day})$$

記号

c, 定数, g, 重力加速度(m/sec²), H; 平均水深(m), Δh, 水面高変位(m), n, 粗度係数, S, エネルギー勾配(河床勾配)(m/m), Th, 流下時間(days), U, 平均流速(m/sec)