

隅田川の水質予測とその対策

東京大学 工学部 都市工学科 杉本 昭 典

はしがき

建設省では、昭和35年以来隅田川の汚濁調査を実施するとともに、水質予測の方法の研究を実施して来た。筆者は、建設省土木研究所在職中、本研究プロジェクトに参加し、水質予測方法の研究する機会をもつことができた。水質調査結果の一部、水質予測の研究の一部は、おびに水産協会主催の下水道研究会、および下水道協会主催のオ1回・オ2回 下水道研究発表会において報告した。今回こいでは、前回の報告に引き続き、昭和38・39年の水質調査結果を利用して、計算因子の再計算および昭和42・45年度における水質汚濁対策によるBOD除去の效果、さらに浄化用水の影響について隅田川のBOD分布、DO分布を予知することができたので、建設省の許可をえてこいに発表する次第である。

2 計算方法

隅田川の水質の予測に用いた方法は、Ketchumの提案したサイクルプログラムの概念を拡張したThames方式によつた。その方法はすでにのべたが、こいに簡単にのべておくことにする。

考えている河川部は、完全混合であると仮定し、ある地点から流入した物質は、潮汐による混合(Tidal Mixing)によつて右図に示すように投入地点の上下流に分散する。今時刻単位を1潮時にとり、B点に投入された物質が1潮時後分散する割合を P_1 , P_2 とし、原点Bに残る部分は $1-P_1-P_2$ となる。拡散距離は L で、これは1潮時の水分子の移動する距離にほぼ等しい。

この計算においては、固有流による物質の移動と潮汐による混合とに分けて計算を実施すると、Paddyによれば水理条件のかなりの範囲内で L , P_1 , P_2 の値がかわらないことをThames間でみいだした。

この値は、水質指標として塩分分布を用いて求めるのは、他の感潮部の混合特性の計算の場合と同じである。さらにこの計算の基本式は、水と塩分の保存条件をもとにして求める。すなわち

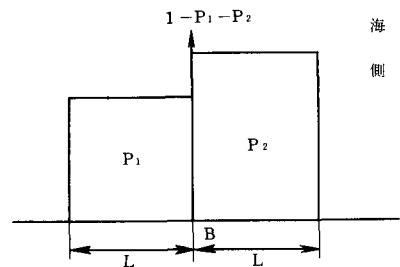
(1) ある期間、ある点を通つて上流に運ばれた塩分は、この期間のかわりに上流にある塩分量からはじめにあった塩分量とこの期間 河口に流出した塩分量とを差し引いたものに等しい。

(2) この地点に入る水の量も(1)と同じ条件を満してゐる。すなわち混合のみによつて水塊の移動はない。

この二つの条件から次の式がとられ2。ただし n 潮時の平均を考へる。

$$\frac{1}{n} \left[\int_0^L \sum_{i=1}^n C A P_2 \frac{L-x}{L} dx + \int_0^L \sum_{i=1}^n C A P_1 \frac{L+x}{L} dx \right] = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n R C + S \right] \quad \text{-----(1)}$$

感潮部混合模型



$$\int_0^L A P_2 \frac{L-x}{L} dx + \int_0^L A P_1 \frac{L+x}{L} dx = 0 \quad \text{-----} \quad (2)$$

こゝに、 L ；混合距離、 P_1 ；混合係数(上流側) P_2 ；混合係数(下流側) C ；塩素イオン濃度又は塩分濃度 A ；半潮時の流率 R ； T 期間の固有流量 S ； T 期間増減した塩素イオン又は塩分濃度 である。

こゝで $A P_1 = X$, $A P_2 = Y$, $\frac{1}{L} \sum_{i=1}^n C = \bar{C}$, $\frac{1}{L} \sum_{i=1}^n R C = \bar{R} C$ $\frac{1}{L} S = 0$ とおき、 X および Y は混合距離 L の範囲内では X の一次函数、 $\bar{C}$ は $-L \leq x \leq L$ の範囲内では $\bar{C} = \alpha x + \beta$ で近似できるとすれば、計算地点を L の間隔にとると次式をうる。

$$X_0 + Y_0 + X_{-L} + Y_{+L} = \frac{12 \bar{R} C}{\alpha L^2} \quad \text{-----} (3), \quad 2Y_0 - 2X_0 + Y_{+L} - X_{-L} = 0 \quad \text{-----} (4)$$

$$\text{但し} \quad \alpha = (C_{+L} - C_{-L}) / 2L$$

実際の塩分濃度分布および水理量と、(3)および(4)式から順次 X , Y , L , $\bar{C}$ を求めることが出来る。

BOD分布の予測

X , Y , L , の値が上の方法で定まると、この値を用いて BOD 分布を (1) 固有流による移送 および (2) 混合とに分けて予測することができる。計算式は次式で表わされる。

$$B' = B e^{-KT} + \int_0^T I e^{-K(T-t)} dt \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$B'' = \frac{1}{A} \left[\int_0^L \frac{B'Y}{L} dx + \int_{-L}^0 \frac{BX}{L} dx + B'(A - X - Y) \right] \quad \text{-----} \quad (6)$$

こゝで B ；ある期間 T のはじめの BOD, B' ；一潮時移送後の BOD (Δx 離れた地点の BOD) B'' ；混合後の BOD K ；河水中の脱酸素恒数, t ；初期地点より廢荷流入地点に至る時間。

実際の計算には (5) 式において $t=0$ すなわち Δx 内の BOD 負荷は 全量初期地点に流入するものとし、(6) 式を細分に直すと次のようになる。

$$B' = e^{-KT} \left(B + \sum_{i=0}^L I_i T \right) \quad \text{-----} \quad (7)$$

$$B'' = \frac{1}{A} \left[\frac{\Delta x}{L} \left(\frac{B_i Y_i}{2} + \sum_{i=1}^{L-1} B'_i Y_i + \frac{B'_0 Y_0}{2} \right) + \frac{\Delta x}{L} \left(\frac{B'_0 X_0}{2} + \sum_{i=0}^{L-1} B'_i X_i + \frac{B'_{-L} X_{-L}}{2} \right) + B'_0 (A - X_0 - Y_0) \right] \quad \text{-----} \quad (8)$$

DO分布

溶存酸素分布は、BOD 分布と同様に 移送と混合とに分けて計算を行なう。計算式は次のようである。

$$D' = D e^{-\int_0^T \frac{G}{H} dt} + \int_0^T K B e^{-\int_0^t \frac{G}{H} dt} dt \quad \text{-----} \quad (9)$$

$$D'' = \frac{1}{A} \left[\int_0^L \frac{D'Y}{L} dx + \int_{-L}^0 \frac{DX}{L} dx + D'(A - X - Y) \right] \quad \text{-----} \quad (10)$$

こゝに、 D ；期間 T のはじめの河水中の DO 不足量, D' ； T 期後移送中 脱酸素 および 腐敗 った気を受け入れた後の 酸素不足量, D'' ；混合後の酸素不足量, K ；脱酸素恒数 G ；酸素交換係数 H ；平均水深, B ；BOD 値 である。

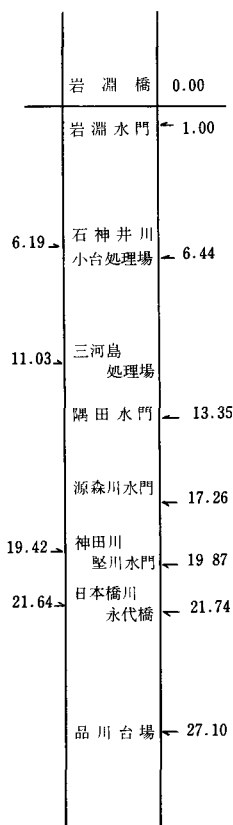
演算にあつて (9) 式における K, G, H, B が 時間的に変動しないものとし かつ (10) 式と和分になお かつ のようになる。

$$D = D_0 e^{-\frac{G}{H} 24T} + k B T e^{-\frac{G}{H} 124T} \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$D' = \frac{1}{A} \left[\frac{\Delta x}{L} \left(\frac{D'_0 Y_0}{2} + \sum_{i=1}^{L-1} D'_i Y_i + \frac{D'_L Y_L}{2} \right) + \frac{\Delta x}{L} \left(\frac{D'_0 X_0}{2} + \sum_{i=1}^{L-1} D'_i X_i + \frac{D'_L X_L}{2} \right) + \sum D'_0 (A_0 - X_0 - Y_0) \right] \quad \dots \dots \dots (12)$$

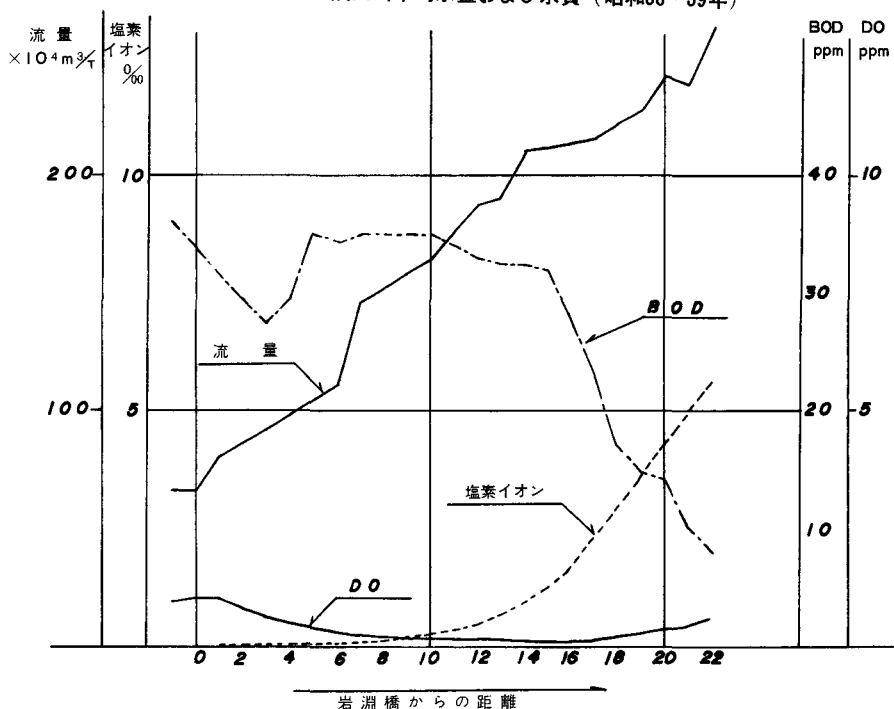
3 隅田川における L, P_1, P_2

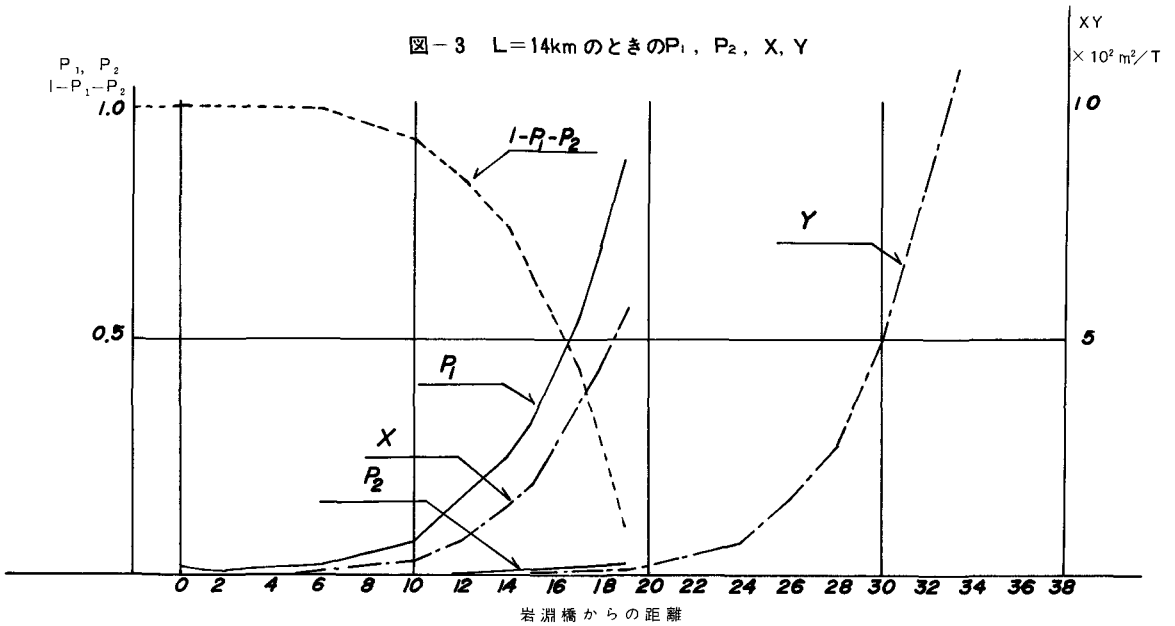
図-1 隅田川距離図



隅田川の計算始点を岩淵橋とした。流入地点の距離図を図-1に示しておいた。隅田川における L, P_1, P_2 を求めるために 昭和38年7月, 10月, 39年2月, 39年5月, 7月9月10月(2回)の観測値を用いて計算することとした。この計算における基本式は、水および塩分の連続式をもとにしていいること、観測値は荒瀬河川としてかなり変動があり、かつ分析上にあることも誤差がかなり入つていいるので、計算には Thomas 2行なつた方法と同様にこれらの観測値の平均値を用いることとした。計算に用いた流量(一潮時あたり)、塩素イオン濃度、BOD、DOを図-2に示した。この値を用つて、式(3)(4)から求めた L , および P_1, P_2 , および XY は 図-3に示すようにもとまり、混合距離は $L=14\text{km}$ がよいことがわかつた。

図-2 隅田川平均水量および水質(昭和38・39年)





4. 現米(25-39年)におけるBOD負荷量 および単位負荷量によるBOD分布

3においてもめた, L , X , Y から任意の地点に投入したBODの n -潮時後の分布を求めた
 おくと, 後の計算に便利である。今100t/kgのBODが各地点に投入されたときの計算値を表1に示す

表-1 BOD投入1T後の拡散係数 (ppm)

100t BOD 流入地集																			
地点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	132.36											0.04	0.04	0.04					
1	133.56	110.16										0.02	0.03	0.03	0.01				
2	0.06	109.90	102.21									0.02	0.04	0.06	0.03	0.02			
3	0.06	0.06	101.88	95.20								0.02	0.04	0.07	0.08	0.06	0.03		
4	0.06	0.06	0.11	74.99	89.11							0.02	0.04	0.08	0.14	0.12	0.09	0.03	
5	0.05	0.06	0.11	94.81	88.74	83.73						0.02	0.04	0.08	0.18	0.20	0.17	0.11	0.04
6	0.06	0.06	0.11	0.25	88.67	83.48	78.85					0.02	0.04	0.08	0.18	0.25	0.27	0.21	0.14
7	0.06	0.06	0.11	0.25	0.30	82.56	77.98	58.66				0.02	0.04	0.08	0.18	0.25	0.33	0.36	0.28
8	0.06	0.06	0.11	0.25	0.30	0.40	77.02	58.09	55.67			0.02	0.04	0.08	0.18	0.25	0.32	0.44	0.48
9	0.05	0.06	0.10	0.22	0.29	0.38	0.52	57.42	55.03	52.77		0.02	0.04	0.07	0.17	0.24	0.31	0.42	0.58
10	0.05	0.06	0.10	0.23	0.28	0.37	0.50	56.57	54.22	52.00	49.88	0.02	0.04	0.07	0.16	0.23	0.30	0.41	0.56
11	0.05	0.06	0.10	0.22	0.27	0.36	0.49	0.85	52.13	49.99	47.96	44.19	0.04	0.07	0.16	0.22	0.29	0.40	0.55
12	0.05	0.06	0.09	0.22	0.26	0.34	0.47	0.82	1.15	48.46	46.48	42.83	39.95	0.07	0.15	0.21	0.28	0.38	0.52
13	0.05	0.05	0.09	0.21	0.25	0.33	0.45	0.79	1.11	1.52	44.65	40.96	38.21	37.14	0.15	0.20	0.27	0.37	0.50
14	0.03	0.05	0.09	0.20	0.24	0.32	0.43	0.75	1.06	1.45	1.97	39.01	36.38	35.37	0.14	0.20	0.26	0.35	0.48
15	0.01	0.04	0.08	0.19	0.23	0.30	0.41	0.72	1.02	1.40	1.90	2.40	33.90	32.94	28.62	0.19	0.25	0.34	0.46
16		0.02	0.06	0.18	0.22	0.29	0.40	0.69	0.97	1.34	1.81	2.30	2.89	27.64	25.50	24.40	0.24	0.32	0.44
17			0.02	0.15	0.21	0.28	0.38	0.67	0.94	1.29	1.74	2.21	2.78	3.66	21.61	20.58	19.27	0.31	0.43
18				0.10	0.18	0.27	0.38	0.66	0.92	1.27	1.72	2.18	2.73	3.60	16.65	15.68	14.43	12.64	0.42
19				0.02	0.12	0.24	0.37	0.65	0.91	1.25	1.67	2.14	2.69	3.55	5.68	10.59	9.37	7.72	5.78

いま 図-2に示したBOD分布が定常状態であると仮定すれば、この計算に利用して各地点におけるBOD負荷をもとめることができる。すなわち式(7)(8)を用い、BOD負荷が、この計算期間中は1箇時にとり、なりと仮定すれば、1T後のBOD分布は現状より低くなる筈である。この差が沿岸から補給されるBOD量となる。このように求めた濃度低下量は表-2のようになった。この値と表-1とから各地点で受荷すべきBOD量を計算から求めると表-2の第三列に示す値となる。かように求めると、岩淵より下流隅田川全線に受荷されるBOD量は82.5t/日となる。東京都下水道局が経済企画庁水質調査課の隅田川の負荷算定に用いた手法を踏襲して求めた負荷量は93.4t/日であるので、この値と比較するとやや少ない。しかし資料の精度を考慮すれば妥当な値とみることができよう。河川に流れた汚濁負荷は以後この計算値を用いることとする。

表-2. IT前後の濃度差と計算負荷量

距離	IT前後の濃度差 ppm	計算負荷量 t/T
0	4.25	2.5
1	1.59	
2	0.18	
3	0.21	
4	3.62	4.0
5	10.59	2.0
6	8.77	
7	6.23	
8	5.47	10.0
9	5.86	
10	5.77	
11	5.32	
12	4.41	12.0
13	5.61	
14	2.32	10.0
15	2.23	6.0
16	8.12	11.0
17	5.52	
18	3.60	
19	4.23	20.0
合計		82.5

5. 汚濁予測

将来、昭和42、45年、における汚濁負荷の変動、浄化用水の隅田川の水質分布への影響を調べため式(7)(8)および式(11)(12)を用いて汚濁予測計算をおこなった。

計算に用いた混合距離 $L = 14 \text{ km}$ 、 XY は前述した値を用いた。脱酸素係数は実測平均値 $0.239 (1/\text{日})$ を用い、酸素交換係数 G は実測値から求めた 8.0 cm/hr を用いることにした。

(a) 計算ケース 計算ケースは、昭和42年、および45年における東京都下水道局の資料によるBOD除去率を用いることにした。すなわち45年における現状より30.6%、42年には57.9%となる。

新河岸川秋ヶ瀬地点で放流される浄化用水は、39年以降の実績などから0、5、10、15、20 m/sの5つのケースで計算することとした。

(b) 境界条件

下流端 計算上の下流端は岩淵橋から45kmの東京湾にあるものとして計算した。BODは25km地点で2.74 ppm、45kmで0.19 ppmであるものとし、溶存酸素は45kmで飽和9.16 ppmと変らないものとした。

上流端 本計算における上流端は岩淵橋0kmであり、浄化用水やBOD負荷の変動が大きいので、昭和38年度調査とせしStreetin-Phelpsの式を用いて汚濁源から追跡計算を行なった0kmにおける境界条件を定めのこととした。汚濁負荷流入率およびBOD負荷は表-3に示すようである。

この結果0kmにおける各ケースの境界条件は表-4に示すようである。45年および42年におけるBOD分布は図4、4、6、図5、4、6のようである。

表-3 新河岸川汚濁負荷量

流入地点(km)	-1.57	-2.42	-3.68	-5.15	-6.58
BOD負荷(t/T)	0.082	10.831	5.414	0.065	4.605

ある。

6 考 察

本汚濁計算計算結果から、年平均温度（この場合 19.2°C ）では昭和42、

45年11月の場合にあり、
 2も 浄化用水量のたがひを
 かりつゝに 好気性状態を
 たもつことが出来ることか
 りかつた。さらに魚が住む
 限度と溶存酸素 4 ppm と
 すれば、昭和45年度にあり
 2 $5\sim 10\text{ m}^3/\text{s}$ の、昭和
 42年度にあり $20\text{ m}^3/\text{s}$
 の浄化用水が必要となる。

さらに 計算の収斂状態か
 ら、浄化用水の効果が安定
 になるには 5 T から 10 T
 必要となる。ふい換之れば
 $4\sim 5$ 日平均して浄化用水
 を注入しないと計算結果と
 は一致しないといえる。さ
 らに夏期においては、隅田
 川の水温は 平均 27°C 程
 度となる。したがって
 河水中の脱酸素現象が活発
 となるので、溶存酸素は
 本論にのべた値を下まわす
 ので、多分 昭和42年度末
 のまじでは 溶存酸素は河
 水中にはなくなり、少くも
 $5\text{ m}^3/\text{s}$ 程度の浄化用水が
 河水を好気性に保つには必
 要となる。このことにつ

表-4 OkmにおけるBODおよびDO (ppm)

浄化用水量 m^3/s	0	5	10	15	20
昭和45年	14.09 2.57	10.09 3.10	7.76 4.19	6.36 5.05	5.38 5.80
昭和42年	24.34 1.53	17.42 2.24	13.40 3.71	10.98 4.72	9.30 5.56

上は BOD, 下は DO

図-4(a) 昭和45年におけるBOD分布

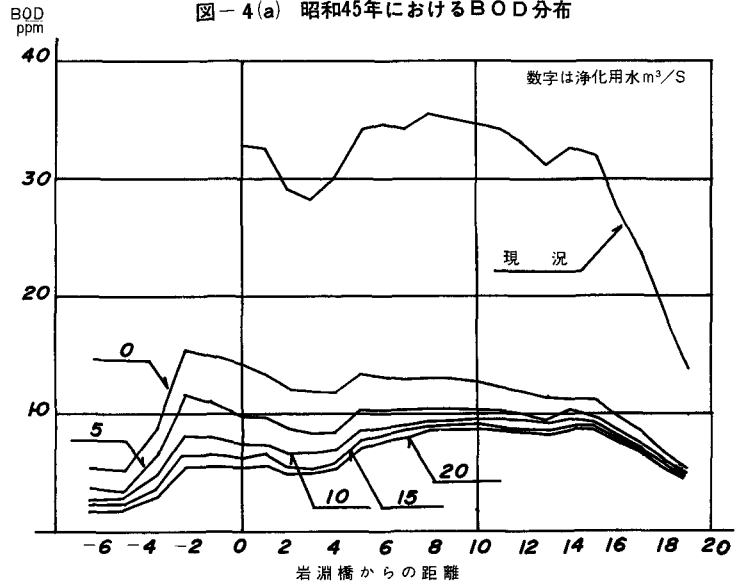
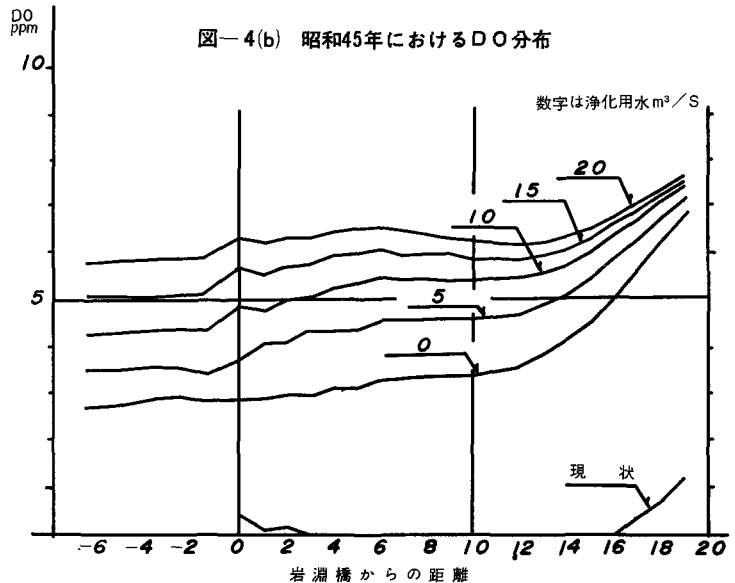


図-4(b) 昭和45年におけるDO分布



112は、現在計算中なので
講演時発表できると思われ
る。

本計算は、多くの関係因子
によつて支配されるが、か
つ実測値もかなり変動し
ており、したがつて
予測精度もかなりこれらの
ことに関係があると思われ
る。さらに汚濁負荷の見積
りにあつても、工場の立地、
人口の移動が、この地区で
は、かなり流動的であつて

さらに、工場の稼働状態
も景気変動などによつて大
きくかわるので、常に汚濁
負荷量によつて修正して
ゆく努力が必要となると思
われる。

7. 謝 辞

本研究にあたり、始終
協力と激励をいただいた
建設省 河川局 治水課、
河川計画課、都市局下水道
課、関東地建 企画室、
河川部 および 荒川下流
工事事務所の皆様にお礼を
いたします。さらに、資料を
こころよく提供下さつた
東京都下水道局にも、感謝
の意を表したいと思ひます。

土木研究所在職中、隅田川の水質分析 および解析に協力し、かつ討論に参加し有益な助言を
いただいた 柏谷宅長以下 下水道研究室の諸君にも、こゝに御礼申し上げたいと思ひます。最後
に、困難な計算を いただいた 日建コンサルタントと東武に御礼申し上げます。

図-5(a) 昭和42年BOD分布

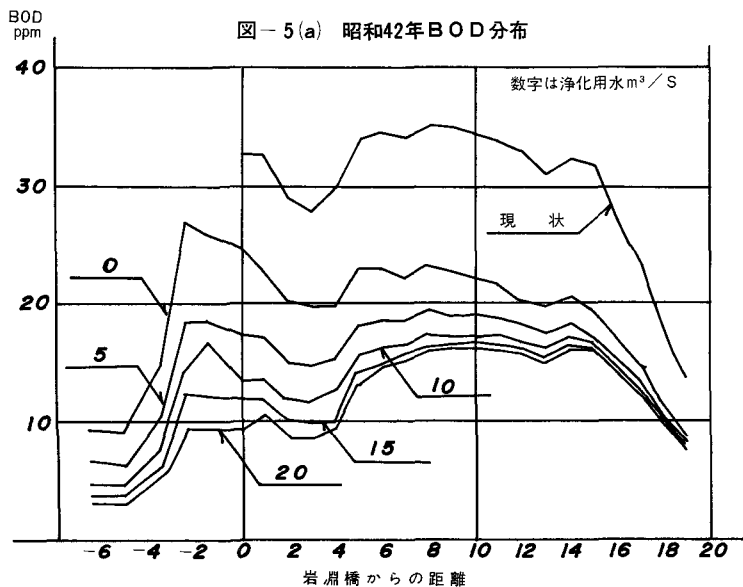


図-5(b) 昭和42年におけるDO分布

