

河川の汚濁負荷流達率に関する研究

STUDY ON RUNOFF RATE OF POLLUTANT LOAD IN RIVER BASINS

浮田正夫*・中西 弘**

By Masao UKITA and Hiroshi NAKANISHI

Runoff rate of pollutant load (COD, N, P) was studied, as a planning parameter for water quality control of lakes or of inner sea areas. With three primary or secondary rivers, Ibo R., Kako R. and Kotoh R., daily sampling surveys more than one year, were practiced. Also, the discharge load in the river basins was calculated in detail. It was confirmed that the runoff rate of pollutant load had better be divided into two stages in convenience, i. e., flow-out and flow-down stage. Good accordance was observed between measured and calculated values of runoff load of pollutant, by setting the former value of flow-out rate 0.7-1.0, the latter value of flow-down rate as an exponential formula of flow-down distance. The application of this method to another several rivers was also satisfiable.

1. ま え が き

最近、河川の汚濁負荷量調査、汚濁機構解析、自浄作用に関する研究が各方面で非常に活発に行われている。

しかしながら、それらの研究は河川そのものを詳しく論じたものがほとんどであり^{1)~10)}、流域内の人間活動の変化に伴って、河川の水質あるいはそれが流れ込む湖沼や内湾の水質がどのような影響を受けるのか、望ましい水質を保つためには流域内の人間活動をどのように制御すればよいかといった、直接、水質管理に結びつく学術研究はなお数少ない状況である^{11)~18)}。

それにもかかわらず、一方で、このような研究に対する社会的な要請はますます大きくなりつつある。

本研究はこのような視点から、湖沼や内湾への河川經由の汚濁負荷を正確に推定することに目標の重点を置き、計画パラメーターとしての流達率の根拠を明らかにし、その精度を向上させることを目的としている。まず本報告では、①流達率の定義と問題点の整理、②大河川における降雨時を含めた通年流達率を測定し、その関数化を試みる。③さらに流量と負荷量の関係等について考

察する。

2. 流達率の定義と問題点

本論文における流達率等の定義は以下のとおりである。

$$\text{排出率} = \frac{\text{排出負荷量}}{\text{発生負荷量}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{流達率} = \frac{\text{流達負荷量}}{\text{排出負荷量}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{流出率} = \frac{\text{支川合流点への流出負荷量}}{\text{流域内排出負荷量}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{流下率} = \frac{\text{本川下流点への流達負荷量}}{\text{支川合流点への流出負荷量}} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{流達率} = \text{流出率} \times \text{流下率} \dots\dots\dots (5)$$

流域下水道の調査指針¹⁹⁾では、本論文でいう流出率を流達率、流下率を浄化残率、流達率を流出率と定義している。また、和田も初期の論文²⁰⁾では、汚濁流達率を汚濁流出率と、河川に入ってから汚濁減衰率の積で表わされるとしているが、後に¹⁶⁾流達率と流出率の位置を入れ替えている。しかし、先の指針では主として河川のBOD予測に重点がおかれており、「湖沼や海域を対象とした汚濁解析においては……年間の平均的な流達率を用いて解析することを原則とする。」という表現もみられる。実際、富栄養化防止下水道調査報告書²¹⁾では、対

* 正会員 工博 山口大学講師 工学部土木工学科
(〒755 宇部市常盤台)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科(同上)

象水域への流達負荷量を排出負荷量に対応させた流達率を用いる方法を採用している。

本研究は湖沼や海域への流入負荷量の算定ということに主眼をおいたものであるため、これらの経緯を踏まえつつ、とりあえずここでは上述の定義を採用しておく。

もちろん、流域を一括して、流達率のみで論ずることも可能であるが、大河川の場合には、流達率を、汚濁物質が排出点から溝、水路を経て、川へ出るまでの面的な流出過程と、川へ出てから本川下流点までの線的な流下過程の2段階に分けて考えるのが妥当であろう。

この場合、留意すべき問題点は以下のとおりである。

① 流出過程に係る集水域の大きさは、i) 排出負荷の算定が容易であること、ii) 集水域内の排出源の分布状況によって、流出率が大幅に変わらないことなどを考慮して、設定する必要がある。大河川の場合、i) の条件を重視して、町村単位、市あるいは区単位で考えるのが実際のところであろう。

② 流出率、流下率両者とも、流域勾配、地下浸透性、水路の整備状況、池やダムの存在、用水の利用状況等の流域特性により、当然地域差があることが予想され、また、時間的にも、季節変化はもとより、通年流達率でも年降雨量の違いによって変化することが考えられる。

したがって、係数等の一般化にあたっては、十分な注意が必要であり、この点に関しては稿を改めて検討する。

③ 自然性負荷については、制御の対象になりにくいので、人為的な負荷とは別の扱いが考えられてよい。現段階では、自然性負荷由来として、流量に応じて若干変動するバックグラウンド水質を設定し、見掛けの実測水質から、これを控除する方法が最も合理的であると考えられるが、本稿ではとりあえず、自然性負荷についても、人為的な負荷に準じて取り扱う。

3. 流達率調査報告例

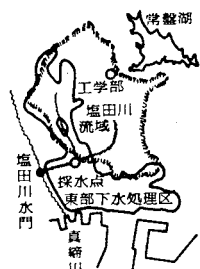
流達率に関する報告例を表1にまとめる。流達率の値を引用する場合は、排出負荷の計算条件、流達負荷の実測条件を十分吟味し、付記しておく必要がある。備考欄に算出方法を記してあるが、排出負荷は必要に応じて著者が再計算を行った。

降雨時を含めた通年流達率に関する情報はあまりみられないが、i) 降雨時を含む流達率は晴天時流達率の1.3~2倍程度の値であること、ii) 都市化の進んだ河川の方が、自然性河川よりも流達率が大きい傾向にあること、iii) P, N, CODに比較して、BODの流達率が最も小さい値を示すことなどが読み取れる。

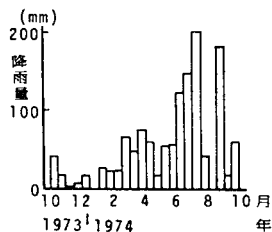
著者が宇部市内の小河川、塩田川(508ha、人口密度50人・ha⁻¹)において、年間のほとんど全降雨に対し、0.5~1時間ごとの水質調査を行い、N, Pの流達率を求めた結果はすでに報告しているが¹³⁾、本論文の筋

表1 N, P等汚濁負荷流達率調査報告例

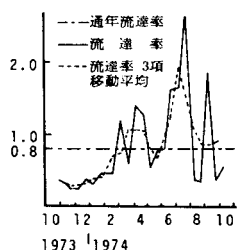
調査者	調査河川	集水面積 (ha)	人口 (人)	人口密度 (人/ha)	流域の特徴	伝達率 (%)			備考		
						N	P	BOD			
福嶋、堂々ら、第9回下水道研究発表会講演集221~224(1972)	住宅東名古屋市街地、大阪大、神戸	73.8	6518	88	コンクリート三面張、管まじり、ポンプ排水 コンクリート三面張 素堀水路 コンクリート三面張	52	56	晴天時6時間ごとのコンポジット1日調査	雑排水N3g/人・日、P0.83g/人・日、浄化槽N8.65g/人・日、P1.45g/人・日の条件で排出負荷を計算している。		
		111.0	5220	47		77	47				
		37.0	4856	131		33	25				
		37.4	5527	148		78	78				
建設省霞ヶ浦工事事務所(1973)	西浦 慈瀬川、山王川、團部川	(ha) 大島(1978)より	20860	2.5	森泉(1976)より 耕地36% 農業地帯 耕地41% 農業地帯、食品、製糸工場 耕地26% 農業地帯、食品、し尿処理	88	56	BOD/COD	1時間ごとのコンポジット毎日1年間測定	排出負荷は若干、筆者が計算しなおした。BOD、COD流出率は原報のまま、NO ₃ -Nのみ週1回の分析値を数延している。	
		1253	11.9	66		77	63	70			
		7780	2.7	86		87	33	57			
	西浦 19河川の平均				49	67	34	62	年4回の通日調査	上記3河川の毎日調査の結果をもとに補正されている。この項の流出率はN, P, BOD, CODとも原報の値を平均したものである。	
±26	±44	±24	±30								
浮田ら(1976) 文献(11)	宇部市塩田川	508	25447	50	素堀農業用水路、一部コンクリート三面張	87	78	(46)	(31)	全降雨時1~2時間ごと	本文参照 ()は晴天時流達率
和相ら(1976) 公害と対策12(7)34~40(1976)	有馬川上流、野川上流、八多川上流、長尾川上流、大沢川、淡河川、志染川上流、志染川下流	12.0	3.3	2.8	温泉街、川へ直接流入 上流住宅団地、河川改修すむ 一部水路整備 自然農地 自然農地 一部園地整備、河川改修すむ 上流住宅団地、河川コンクリート 自然農地、伏流水多い	61		21	晴天時4回3年分のデータ	排出負荷の一部を筆者が計算しなおした。農地負荷は農地面積に200kgN/ha/年を乗じ、その30%が排出されるものとした。生活下水は原報のまま。	
		28.7	24.5	8.5		25	18				
		13.1	2.7	2.0		18	16				
		14.6	2.1	1.5		6.5	9				
		16.1	1.7	1.1		13	14				
		47.4	4.2	0.88		12	30				
		28.2	34.3	12.2		70	51,				
20.0	1.9	0.95	89	14							
長崎県(1977)	本明川、境川、西郷川	1.4	8.6	60	市街地 自然農地 自然農地	82	70	41	昭和50年度12回の測定	雑排水、し尿浄化槽などでN5.05g/人/日、P1.14g/人/日を用いる。肥料流出は筆者が計算しなおした。家畜汚水は発生負荷が排出負荷が確かでない。	
		(9.9)				35	34				
		(11.3)				48	36				
水島ら(1974) 下水道研究発表会講演集506~508(1977)	中ノ井川	12.0	15.7	13.1	農村地帯、新興住宅 工場排水も割に多い	46	66	(33)	(46)	晴天時7回 雨天時5回	昭和51年10~11月の値()は晴天時流達率、雑排水N1.8g、P0.26g/人/日、肥料流出はN123kg/ha/年、排出率0.25、P54kg/ha/年、排出率0.02でやり直した。
小林、中島ら(1978) 文献(8)	桑納川	26.0	99.6	38.3	ベッドタウン、農業地帯 下水処理場、し尿処理場 工場排水もあり	106	156	(70)	昭和52年1月~3月 2~3回通日	排出負荷の算定は筆者らの方法とは同じである。ただし肥料流出は別途計算して追加した。	
小林、中島ら(1979)	神崎川	54.2	53.3	9.8	上流にベッドタウン 市街地、その他は農業地帯	9	9	(20)	昭和53年1月~2月1~2回通日	肥料流出、家畜による負荷も排出負荷に加算した。	
岡松ら(1979) 文献(14)	琵琶湖流出水	3120	989	3.2	滋賀県ほとんど全域 琵琶湖面積は674km ²	41	28	(44)	昭和53年8月~54年7月、毎日調査	排出負荷は筆者が推定。	



図一 塩田川調査地域の概要



図二 調査期間の降雨量



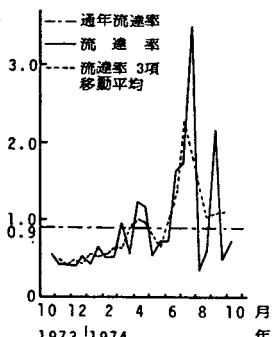
図三 P 流達率の季節変動

表一 塩田川の N, P 排出負荷量 (kg・日⁻¹)

	N	P
家庭雑排水	45.0	15.0
し尿浄化槽	12.2	1.24
肥料流出	21.2	0.65
家畜汚水	1.2	0.09
工場排水	3.9	0.70
デポジット	11.3	0.95
合計	94.8	18.6

表三 塩田川の N, P 流量負荷量 (kg・日⁻¹)

	晴天時	全平均
NH ₄ -N	19.6	30.3
NO _{2,3} -N	5.0	21.8
Kj-N	38.6	63.0
TN	43.6	84.8
TP	5.8	14.9



図四 N 流達率の季節変動

立てに必要であるので、その成果の要約のみを略述しておく。

すなわち、表一に示す排出負荷に対して、実測した流達負荷は表三に示すとおりであり、

① 降雨時を含む通年の N, P 流達率は、N 0.87, P 0.79 であり、降下ばいじんによる排出負荷を、測定位置の偏りを考えて、当初の N で 2 倍、P で 3 倍と見積った場合は、N 0.79, P 0.72, 同じく晴天時流達率は N 0.36, P 0.28 であること、

② 排出負荷を年平均値として固定した場合、N, P の半月ごとの流出率は、降雨量の大小に対応して、0.4~3 程度の大きな季節変動を示すこと (図二~図四)、

③ NO₃-N の降雨時年間負荷は施肥された N 量の 25% にあたること、などを明らかにした。

4. 研究方法

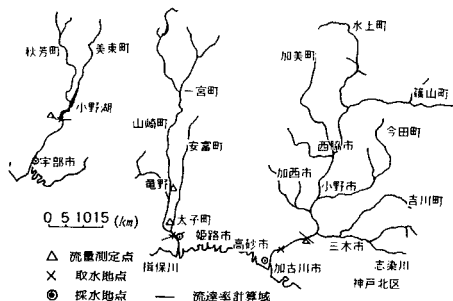
(1) 調査河川および調査期間

調査対象河川は瀬戸内海へそそぐ、兵庫県の 1 級河川

にあたる揖保川、加古川および、山口県の 2 級河川である厚東川である。これら 3 河川の概要は表一にまとめるとおりである。揖保川では竜野市南部の皮革工業による COD, N 負荷、加古川では西脇市周辺の繊維染色工業の COD, P 負荷の影響が大きい。厚東川においては、さしたる負荷源はなく、自然性負荷や農業排水負荷が主体を占める。

調査期間は、揖保川では昭和 54 年 8 月 6 日から昭和 55 年 9 月 30 日まで、加古川では昭和 54 年 8 月 27 日から昭和 55 年 9 月 30 日までの 1 年間強、厚東川では、昭和 54 年 6 月から昭和 56 年 6 月までの約 2 年間である。

採水頻度は、厚東川では毎日午前中 1 回、他 2 河川では水質変動の特性を考慮して、揖保川では毎日 8 時と 20 時、加古川では毎日 4 時と 16 時の 2 回採水し等量混合した。採水はいずれも工業用水の原水で代用した。すなわち揖保川では堰の上流 120 m の地点において、河床から 0.5 m 高まった根固め部 (径 40 m 程度) の中心に開口した径 6 m の取水井 (外水位 1.5 m, 内水位 1.2 m) からの表流水原水である。また加古川では、右岸の取水門から取水され、導水された表流水原水、厚東川では、ダムサイトの水深約 19 m より取水され、導水されたダム原水である。したがって大型のごみや、砂の一部はスクリーンや沈砂池を経て除かれていると考えられる。



図五 調査対象 3 河川の流域概要図

表四 調査河川の概要

	揖保川	加古川	厚東川
流域面積 (km ²) (調査対象分)	810 (809)	1730 (1639)	405 (324)
幹線流路延長 (km)	70	96	60
流量測定点	揖保川竜野林田川構	国包	厚東川ダム
平均流量 1973~1978 (m ³ ・s ⁻¹) (竜野のみ)	28.4	45.6	10.58
比流量 (10 ³ m ³ ・日 ⁻¹ ・km ⁻²)	3.75	2.40	2.82
常住人口 (10 ³ 人)	115.8	405.4	19.2
人口密度 (人・km ⁻²)	143	247	59
取水地点	王子橋取水堰	高砂取水点	厚東川ダム
採水地点	S 社ポンプ所	K 社浄水所	平原分水槽

(2) 水質分析および流量の算定

分析項目はCOD, sol COD (sol:溶解性), NH₄-N, NO_{2,3}-N, Kj-N, sol Kj-N, PO₄-P, sol TP, TPの9項目である。

運搬と分析の都合上, 試料は1週分ずつまとめて分析した。兵庫県の2河川については, No.5C 汚液を冷凍した試水と, 500 ml 当たり 1 ml の硫酸を加えて冷蔵した試水を空輸して, 前者をNH₄-N, NO_{2,3}-N, PO₄-Pの分析に供し, 後者をそれ以外の項目の分析に供した。溶解性の水質項目は後者の試料をGFC 汚過した汚液を用いた。

分析方法はJIS K 0102に準じ, 著者らが一部改良した方法によった²³⁾。

流量は揖保川, 加古川については, 1級河川流量測定点の水位記録から前年の水位・流量換算式にあてはめて算出し, 厚東川については, ダム管理事務所の放水量データによった。

流達負荷量はそれぞれ日平均水質に日流量を乗じることにより算出した。

(3) 排出負荷量の算定

排出負荷量は各河川ともおおむね市町村単位を流域区分として, 原単位計算により推定した。区分数は揖保川8, 加古川22, 厚東川5である。

原単位の設定にあたっては, 十分に慎重を期するとともに, 地域性を考慮して, 揖保川の皮革工業, 加古川の繊維工業については2回の実態調査ならびに各1回の上流部水質調査を行って, 推定精度の向上に努めた。

① 家庭下水の原単位および排出率は表一5に示すと

表一5 家庭下水の発生負荷原単位および排出率

		COD	N	P
し尿	原単位 (g・人 ⁻¹ ・日)	15	10.2	1.14
排出率	し尿処理	0.18	0.585	0.50
	単独浄化槽	0.6	0.85	0.85
	合併浄化槽	0.3	0.6	0.7
	自家処理	0.018	0.18	0.02
雑排水	原単位 (g・人 ⁻¹ ・日)	16	2.0	0.62
排出率	未処理	1	1	1
	合併浄化槽	0.3	0.6	0.7

表一6 家畜汚水の排出負荷原単位 (g・頭⁻¹・日⁻¹)

		兵庫 県			山口 県		
		COD	N	P	COD	N	P
牛	肉牛および乳牛飼養頭数	26.7	43.6	0.86	27.4	45.8	0.81
豚	飼養頭数	11.4	9.49	0.89	7.11	8.68	0.47
鶏	採卵鶏および1/2肉用鶏飼養数	0.124	0.42	0.019	0.14	0.46	0.17

おりである。なお神戸市北区については昼間人口の移動を考慮した。

② 肥料流出について, 各県の実情を考慮した施肥量および使用した排出率は表一6に示すとおりである。

③ 家畜汚水について, 各県の処理・処分状況を考慮した総括的な排出負荷原単位の値を表一7に示す。

④ 工場排水 工場排水の原単位は通産省, 環境庁, 各府県の資料や, 物質収支的な検討を総合して, 表一8に示すような値を用いた。皮革工業および繊維染色工業排水の実態調査結果は表一9に示すとおりであり, 当該地区に対しては, この結果に基づく原単位を使用した。

⑤ 自然性負荷 各河川の人為的汚濁の無視し得る3地点で測定した水質を表一4の比流量を乗じて, 自然性負荷原単位を計算した結果を表一10に示した。

ここではこれらの値と文献値を参考にして, 全流域面積に対して, COD 15 kg・ha⁻¹・年⁻¹, N 3 kg・ha⁻¹・年⁻¹, P 0.2 kg・ha⁻¹・年⁻¹なる原単位を採用した。

表一7 肥料流出の発生負荷原単位(施肥量)と排出率

	施肥量 (kg・ha ⁻¹ ・年 ⁻¹)				排出率	
	兵庫 県		山口 県		N	P
	N	P	N	P		
米	85	37	74	32.4	0.2	0.03
麦・雑穀	162	57	67	20.8	0.3	0.02
いも	183	78	60	13.0	0.3	0.02
豆	60	36	10	17.5	0.3	0.02
野菜	276	115	169	35.3	0.3	0.02
果樹	219	83	186	67.6	0.3	0.02
工業作物	198	38	251	47.3	0.3	0.02
茶	125	30	250	26.2	0.3	0.02
飼肥作物	104	50	101	24.7	0.2	0.01
その他	93	22.7	—	—	0.25	0.02

(CODは農地排水の実測値を参考にして, P負荷×20により求める。)

表一8 工場排水の排出負荷原単位 (kg・日⁻¹/(億円・年⁻¹))

		COD	N	P	備考
18, 19	食料品	2.0	0.77	0.13	西脇地区
20	繊維	2.5	0.35	0.1	
		5.6	0.35	0.28	
21	衣服その他	0.2	0.05	0.01	
22	木材木製品	0.2	0.05	0.01	
23	家具装備品	0.2	0.05	0.02	
24	パルプ紙加工	5	0.5	0.1	
		20	0.5	0.1	
25	出版・印刷	0.1	0.04	0.005	
26	化学	3	1.6	0.12	
28	ゴム製品	0.4	0.1	0.01	山南町
29	皮革	10	3.7	0.05	
		30	12	0.18	
		20	9	0.02	
30	窯業・土石	0.2	0.04	0.004	
31	鉄鋼業	0.1	0.025	0.002	
32	非鉄金属	0.5	0.2	0.01	
33~37	金属機械器具	0.1	0.035	0.026	
39	その他	0.3	0.03	0.003	

表-9 皮革および繊維染色工業排水の水質および負荷原単位

地区	排水区分	試料数	流量 (m³/日)	水質 (mg/l)			負荷量 (kg/日)			原単位 (kg/日)/(億円/年)		
				COD	N	P	COD	N	P	COD	N	P
A地区 皮革	処理前	4	—	440	170	2.7	410	160	2.5	30	12	0.18
	処理後	2	930	310	140	0.32	290	130	0.3	20	9	0.02
B地区 繊維	淡排水	8	21 740	108	4.5	6.6	2 350	99	143	—	—	—
	濃排水	7	3 310	71	15.2	11.3	230	50	37	—	—	—
	加工・その他	3	3 140	—	—	—	1 110	81	7	—	—	—
地区計			28 190	—	—	—	3 690	230	187	5.6	0.35	0.28

表-10 上流部河川水質と自然性負荷原単位

	比流量 m³/(日・km²)	調査時期	試料数	水質 (mg/l)			原単位 kg/(km²・m)			換算値 kg/(ha・年)		
				COD	N	P	COD	N	P	COD	N	P
揖保川	3 750	S 54.12 本調査	6	1.43	0.25	0.021	5.4	0.94	0.079	採用値 (15)	3	0.2)
加古川	2 400	S 53年度 神戸市	8	0.55	0.36	0.010	1.3	0.86	0.024			
厚東川	2 820	S 54.11 本調査	8	1.09	0.48	0.018	3.1	1.35	0.051			
平均値	—	—	—	1.0	0.36	0.016	3.3	1.05	0.051	12	3.8	0.19

なお、各発生源基数については、各県統計年鑑、各県農林水産統計年報、市町村別し尿処理処分状況資料、公共下水道統計、地場産業関連資料等により設定した。神戸、姫路、宇部など、一部のみ流域に係る場合については、各市統計書、市役所への聞きとり等により発生源基数の割りふりを行った。

5. 研究結果および考察

(1) 排出負荷

負荷源ごとのCOD, N, P排出負荷の全流域に係る集計値を表-11に示す。厚東川では農業排水および自然性負荷が大部分を占め、家庭下水、工場排水の寄与率はCOD 14%, N 8%, P 30%である。加古川では、負荷源が比較的均衡しており、家庭下水および工場排水の寄与率は、COD 59%, N 44%, P 76%である。揖保川では工場排水の寄与率が大きく、COD 59%, N 67%, P 36%で、家庭下水を合わせると、COD 79%, N 79%, P 78%を占める。

全体では、揖保川でCOD 21 t・日⁻¹, N 7.8 t・日⁻¹, P 0.41 t・日⁻¹, 加古川でCOD 25 t・日⁻¹, N 9.2 t・日⁻¹, P 1.06 t・日⁻¹, 厚東川でCOD 2.3 t・日⁻¹, N 0.96 t・日⁻¹, P 0.057 t・日⁻¹という結果が得られた。

(2) 流達負荷

昭和54年9月から翌年8月までの1年間の3河川の汚濁負荷実測値の月別変化を図-6, 7, 8に示す。

流達負荷量の変化はそれぞれ降雨量の変化とよく対応しており、またN, PさらにはCODともほぼ同様の変化を示している。

表-12には各河川の流達負荷の平均値を示す。厚東

表-11 負荷源別排出負荷集計値

	家庭下水	工場排水	家畜汚水	肥料流出	自然性負荷	計	
揖保川	COD	2.36 (11)	14.20 (68)	0.94 (5)	3.27 (16)	20.77	
	N	0.97 (12)	5.23 (67)	0.43 (6)	0.49 (7)	0.65 (8)	7.77
	P	150 (36)	178 (42)	19 (5)	23 (6)	43 (11)	413
加古川	COD	7.18 (29)	7.72 (30)	3.46 (14)	6.73 (27)	25.09	
	N	3.02 (32)	1.11 (12)	1.91 (21)	1.80 (20)	1.35 (15)	9.19
	P	478 (45)	327 (31)	85 (8)	84 (8)	90 (8)	1 064
厚東川	COD	0.29 (13)	0.02 (1)	0.47 (20)	1.55 (66)	2.33	
	N	0.066 (7)	0.009 (1)	0.26 (27)	0.31 (33)	0.31 (32)	0.96
	P	15.7 (28)	0.9 (2)	7.0 (12)	12.7 (22)	20.7 (36)	56.7

単位：P(kg・日⁻¹), その他(t・日⁻¹), ()内は%。

表-12 3河川の年平均流達負荷と総括流達率

	降雨量 (mm・年 ⁻¹)	流量 (10 ⁴ m³・日 ⁻¹)	S48 ~ 52 平均値	年平均流達負荷 (t・日 ⁻¹)			総括流達率			自然性負荷を除外した流達率		
				COD	N	P	COD	N	P	COD	N	P
揖保川	2 285	344	303	15.3	6.04	0.33	0.74	0.78	0.80	0.68	0.67	0.75
加古川	1 653	478	394	22.2	6.69	0.73	0.88	0.73	0.69	0.95	0.63	0.67
厚東川	2 476	151	91	4.28	1.08	0.077	1.84	1.12	1.35	3.6	1.26	1.45
*	1 557	88		2.57	0.63	0.031	1.10	0.65	0.54	2.2	0.54	0.42
**	2 769	199		5.95	1.49	0.104	2.56	1.55	1.82	5.1	1.80	2.00

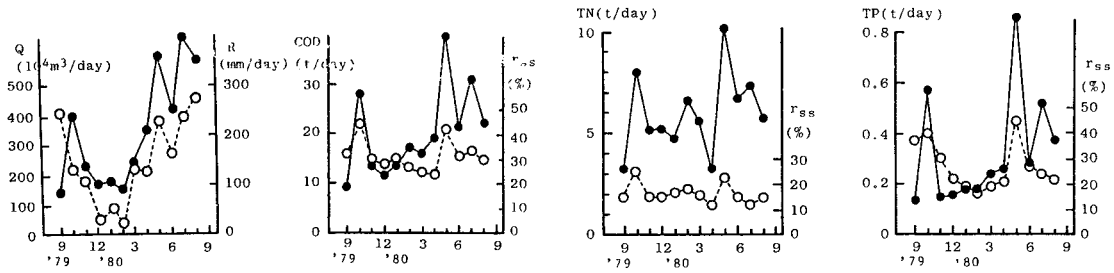


図-6 揖保川の流量・負荷量等の季節変化 (●-流量あるいは負荷量 ○-雨量あるいはSS成分比)

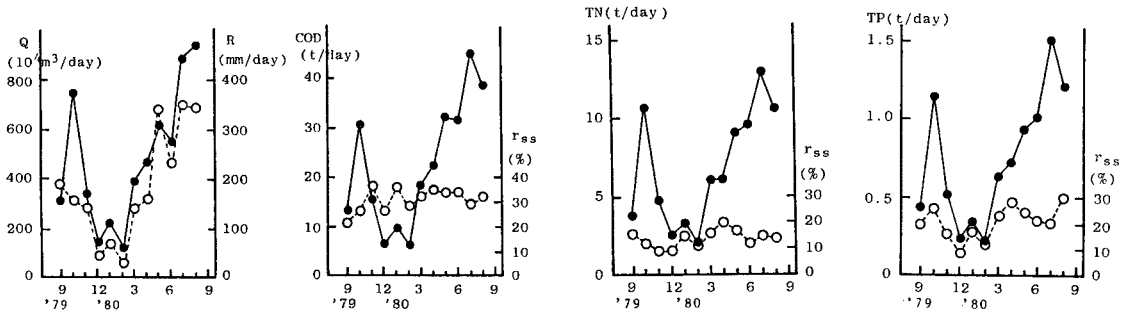


図-7 加古川の流量・負荷量等の季節変化 (●-流量あるいは負荷量 ○-雨量あるいはSS成分比)

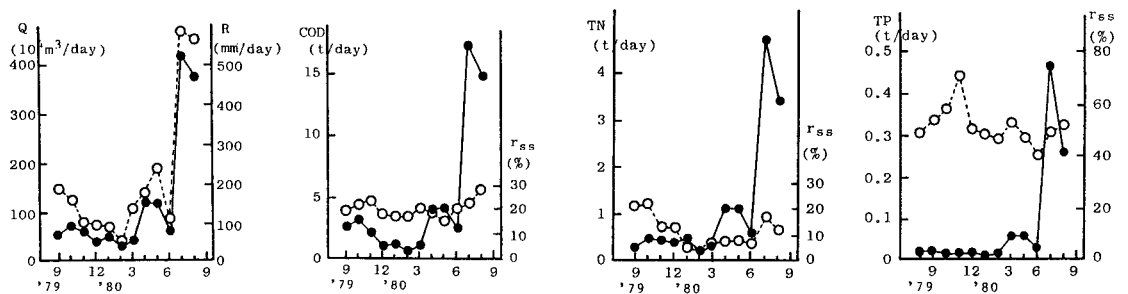


図-8 厚東川の流量・負荷量等の季節変化 (●-流量あるいは負荷量 ○-雨量あるいはSS成分比)

川については、他2河川と同期間の集計と、昭和54年7月から翌年6月までの1年間と、昭和55年7月から翌年6月までの1年間についても集計値を示している。

揖保川では、COD $15 \text{ t} \cdot \text{日}^{-1}$ 、N $6.0 \text{ t} \cdot \text{日}^{-1}$ 、P $0.33 \text{ t} \cdot \text{日}^{-1}$ 、加古川では、COD $22 \text{ t} \cdot \text{日}^{-1}$ 、N $6.7 \text{ t} \cdot \text{日}^{-1}$ 、P $0.73 \text{ t} \cdot \text{日}^{-1}$ 、同期間の厚東川では、COD $4.3 \text{ t} \cdot \text{日}^{-1}$ 、N $1.1 \text{ t} \cdot \text{日}^{-1}$ 、P $0.08 \text{ t} \cdot \text{日}^{-1}$ という結果が得られた。

厚東川の3集計値の間には、ダム湖尻の下層水の取水であるという特殊性はあるにせよ、流量の違い、年降雨量の違いによって、2~3倍の差がみられることは注目すべきことである。

(3) 総括流達率

流域全体の、自然性負荷を含む排出負荷合計に対する流達負荷の割合を、大河川の流域を一括するという意味で総括流達率として、この算出結果を同じく表-12に示す。

揖保川では、COD 0.74、N 0.78、P 0.80、加古川では、COD 0.88、N 0.73、P 0.69、厚東川の同期間では、COD 1.84、N 1.13、P 1.36、平年なみの降雨量に対処する昭和54年7月から翌年6月までの1年間では、COD 1.12、N 0.57、P 0.51の値が得られた。

流達負荷より、バックグラウンド水質と年平均流量を乗じて得られる負荷量を差し引き、一方排出負荷からも、自然性負荷を除外して、人為性負荷に対する正味の総括流達率を試算した結果は、同じく表-12最終欄に示す。これらの値は先の自然性負荷を含む流達率よりも小さめの値になるべきものと予想されるが、かえって大きめの値になったものもある。これは、降雨によって流量が増大するときにはバックグラウンド濃度も増加するのではないかということを示唆している。この傾向はCODについて著しい。

厚東川の流達率が降雨量の多い年に過大な値を示して

いる理由としては、ダム湖尻の下層水の水質が降雨時のゲート放流水質と比較して、より高濃度となっている可能性を挙げることができる。また同河川でCODの流達率が1を大きく超えるのはダム湖における内部生産によるものである。したがって、厚東川のデータの解釈においては、他の2河川と異なり、サンプルの代表性にやや問題があることに注意が必要である。

(4) 流出率、流下率を考慮した流達率

大河川については全流域を一括して扱ってしまうことは、負荷源の位置によって、実質的な流達率が変わってくる可能性があるため、流域をいくつかのブロックに分け、流出、流下の段階に分けて、流達負荷を算出するのが合理的な方法であると考えられる。式で表わすと、

$$L_j = L_0 + \sum_i (F_2(i) \cdot \sum_j (F_1(i, j) \cdot L(i, j))) \dots (6)$$

ここに、

- L_j : 当該調査点の流達負荷 (t・日⁻¹)
- $L(i, j)$: ブロック i の負荷源 j の排出負荷 (t・日⁻¹)
- $F_1(i, j)$: ブロック i , 負荷源 j の降雨時を含めた流出率
- $F_2(i)$: ブロック i の降雨時を含めた流下率
- L_0 : 自然性負荷 (流達率は1.0とみる)

計算に用いた流出率、流下率は表—13にまとめることである。

流出率については、塩田川における調査等の経験から同表上段に示すように、0.7~1.0の値を用いた。

流下率については、流下距離の関数として、次式で求める。

$$F_2 = \exp(-K_2 x) \dots (7)$$

ここに、

- K_2 : 流下率に係る減少係数 (km⁻¹)
- x : 流下距離 (km)

3河川の各水質項目の流達負荷を共通的によく説明し

表—13 流出率、流下率の設定

流出率	COD, N, P 共通	
	工業排水および自然性負荷	1.0
家畜汚水および肥料流出	0.7	
家庭下水(市町村の状況により)	0.7~1.0	
流下率	COD, N, P 共通	
	式(7)による	ただし、自然性負荷については 1.0

表—14 流達負荷計算値と実測値の比較

		COD 流達負荷 (t・日 ⁻¹)			N 流達負荷 (t・日 ⁻¹)			P 流達負荷 (t・日 ⁻¹)		
		計算値(a)	実測値(b)	b/a	(a)	(b)	b/a	(a)	(b)	b/a
		揖保川	'79.9~'80.8	18.9	15.3	0.81	6.81	6.04	0.89	0.335
加古川	"	18.8	22.2	1.18	6.03	6.69	1.11	0.730	0.733	1.00
厚東川	"	1.98	4.28	2.2	0.67	1.08	1.6	0.041	0.077	1.9
	79.7~'80.6		2.57	1.3		0.63	0.94		0.031	0.76

得る K_2 の値をトライアルにより求め、 $K_2 = 0.0112 \text{ km}^{-1}$ を得た。

本来、これらの係数は、降雨量や流域特性によって変わるものであり、また、水質項目によっても異なった値を示すものと考えられるが、i) 検討に値する通年調査データの蓄積が不十分であること、ii) 自然性負荷や、今回の場合は揖保川の皮革工業など、排出負荷の算定精度にもやや不十分な部分があることから、現段階では、考え方に重点を置き、これ以上の詳細な議論は後報に譲る。

ともあれ、3河川について、このような方法によって算出した流達負荷計算値と実測値の比較は表—14に示すごとくであるが、厚東川を除いて、計算値と実測値は比較的よく一致している。厚東川の昭和54年9月から昭和55年8月の間の実測値と計算値のずれが大きいのは同時期の年降雨量が2476mmと平年に比べてかなり大きかったことと対応している。しかし、厚東川の場合も、平年なみの降雨量であった昭和54年7月から翌年6月の場合についてみれば、両者のずれはさほど大きくない。

本法の有用性を検証するため、別に瀬戸内海東部の流入負荷を知る目的で、上記3河川と同じ方式で、河川の流域ブロックごとに排出負荷の原単位計算を行った結果を利用して、不十分ながら実測資料のある主要な河川について、流達負荷の上記の方法による計算値と実測値の対応をみたのが図—9~図—11である。

なお3河川について、月1回の水質データと年平均流量から推定された精度を検討した結果を表—15に示すが、一部の項目を除いて、大河川の場合には、このような簡単な方法でも、流達負荷の概略値を知るには十分であると判断される。同表中、揖保川のCOD, TNは皮革排水の希釈、厚東川のTPは大流量時のダム下層水質の上昇を反映してやや誤差が大きい。

図—9~図—11でみると、瀬戸内海東部の数河川についても、計算値と実測値はCOD, N, Pとも、比較的よく対応していることがわかり、本法の一般的な有用性が確認されたといえる。

(5) 流量と負荷量の関係

3河川それぞれの全データにつき、流量と負荷量の関係を最も一般的な指数式、

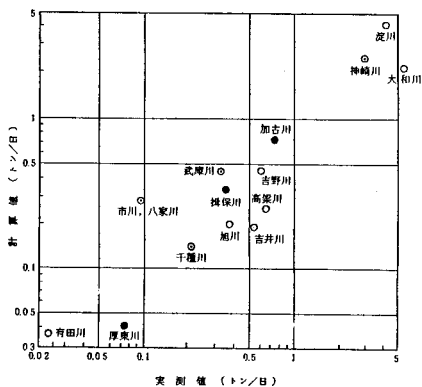
$$L = kQ^n \dots (8)$$

表—15 月1回の水質データと年平均流量から算出された
流達負荷の精度 (1979.9~1980.8)

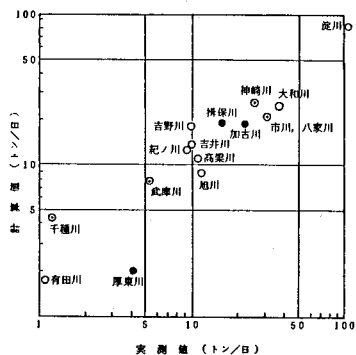
	COD		TN		TP	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
揖保川	13.5~ 22.3	0.88~ 1.46	6.1~ 9.5	1.01~ 1.57	0.27~0.43	0.81~ 1.30
加古川	19.1~ 24.5	0.86~ 1.10	6.7~ 7.5	1.00~ 1.12	0.61~0.84	0.84~ 1.15
厚東川	3.8~ 4.5	0.89~ 1.05	0.92~ 1.23	0.85~ 1.14	0.038~ 0.065	0.49~ 0.84

(a) 年12回の水質平均値×年平均流量で求めた流達負荷30組の最小値~最大値 (t・日⁻¹)

(b) 表—12の年平均負荷(毎日負荷の年間平均値)に対する(a)の相対値

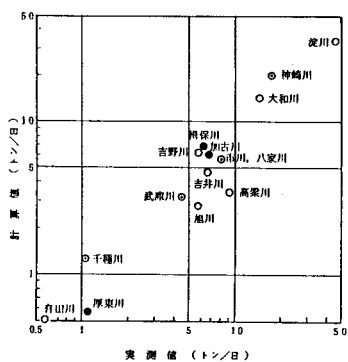


図—10 T-P 流達負荷計算値と実測値の比較

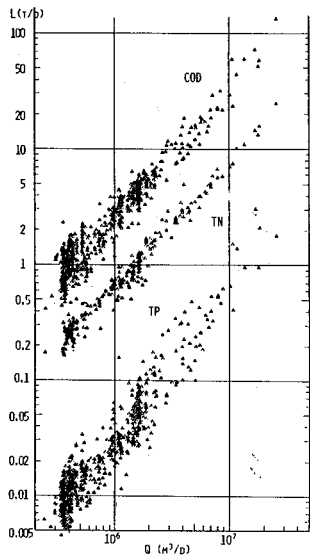


図—9 COD 流達負荷計算値と実測値の比較

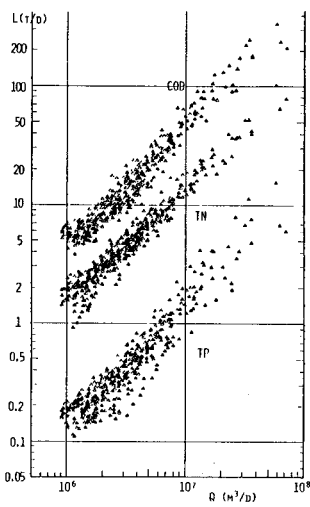
- 各府県の水質実測値に年平均流量(流量年表)を乗じたものを実測値としたもの
- ◎ 各府県の測定水質に測定時流量を乗じたものを実測値としたもの
- 本調査の実測値によるもの



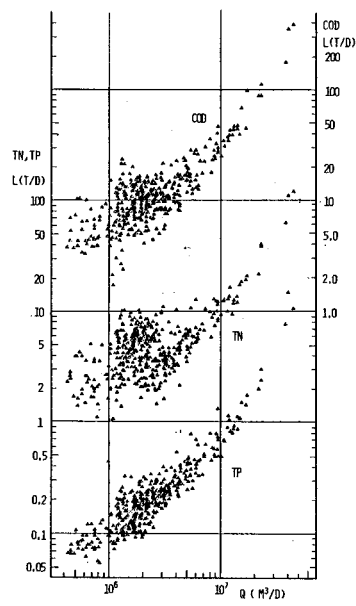
図—11 T-N 流達負荷計算値と実測値の比較



図—12 厚東川の流量と負荷量との関係 (N=675)



図—13 加古川の流量と負荷量との関係 (N=401)



図—14 揖保川の流量と負荷量との関係 (N=422)

表-16 3河川の流量と負荷量の関係

		COD	solCOD	TN	solTN	TP	solTP
厚東川 N=675	r	0.97	0.97	0.93	0.98	0.93	0.96
	n	1.08	1.07	1.07	1.09	1.24	1.22
	k	18.0 ×10 ⁻³	14.5 ×10 ⁻³	4.52 ×10 ⁻³	3.81 ×10 ⁻³	1.01 ×10 ⁻⁴	0.57 ×10 ⁻⁴
揖保川 N=422	r	0.80	0.85	0.71	0.77	0.81	0.93
	n	0.680	0.683	0.504	0.525	0.851	1.010
	k	0.273	0.185	0.302	0.228	2.01 ×10 ⁻³	0.60 ×10 ⁻³
加古川 N=401	r	0.95	0.97	0.97	0.97	0.88	0.90
	n	1.029	0.992	0.959	0.925	1.019	0.936
	k	37.2 ×10 ⁻³	32.4 ×10 ⁻³	18.0 ×10 ⁻³	19.3 ×10 ⁻³	1.21 ×10 ⁻³	1.63 ×10 ⁻³

r: L~Qⁿの相関係数 L(t/日)
n, k: L=kQⁿの係数 Q(10⁴m³/日)

L: 負荷量 (t・日⁻¹), Q: 流量 (10⁴m³・日⁻¹)

をあてはめ、最小二乗法により、kとnを決定し、さらにLとQⁿの間の相関係数を求めた結果は表-16に示すとおりである。また図-12~図-14には、加古川、厚東川、揖保川について、Q~Lの関係を両対数紙にプロットしたグラフを示している。

皮革工場の影響を受ける揖保川のCODとNを除いて、全般的にみて、L~Qⁿの相関は高く、加古川のCOD、N、P、厚東川のCOD、Nについては、nも1.0に近く、負荷量がほとんど流量によって決定されることを示している。

しかし比例定数に相当する水質は、流域内の人為活動の違いを反映して、河川ごとに異なった値をもつ。

大河川におけるこのような現象は、自然のもつ緩衝作用によるものと考えられるが、非常に興味深く、また注目すべきことである。

先にも述べたように、大河川については、特殊な場合を除いて、年12回程度の水質濃度平均値に年平均流量を乗じて、流達負荷量を求める方法も第一次近似として有効であると考えられる。

(6) 溶解性成分、SS性成分等の割合

表-17は、3河川のCOD、N、P各項目について、溶解性成分(sol-)、SS性成分(SS-)、無機態成分(I-)

表-17 COD, N, P流達負荷に占める溶解性成分, SS性成分等各態成分の割合 (単位: %)

	COD			N			P				
	sol-COD COD	SS-COD COD	sol-N TN	SS-N TN	NO ₃ -N TN	NH ₄ -N TN	I-N TN	sol-P TP	SS-P TP	PO ₄ -P TP	
全期間	揖保川	67	33	83	17	35	33	68	32	65	
	加古川	68	32	85	15	66	9	75	76	24	62
	厚東川	77	23	88	12	63	3	66	49	51	32
	平均	71	29	85	15	55	15	70	64	36	53
	低水流 量以下	揖保川	69	31	82	18	18	45	63	66	34
	加古川	73	27	90	10	68	8	76	90	10	74
	厚東川	80	20	89	11	62	5	67	51	49	28
	平均	74	26	87	13	49	19	69	69	31	56

等の負荷割合を、全期間および低水流量以下の日の平均値として算出した結果をまとめたものである。

3河川、3項目とも、溶解性成分の割合が比較的大きく、全期間では、COD 71%, N 85%, P 64%, 低水流量以下では、COD 74%, N 87%, P 69% となっており、後者で若干ずつ割合が高くなっている。

降雨時にはSS性成分の割合が若干高まり、特にPにおいてその傾向が著しい。

無機態Nの割合は70%程度であり、厚東川、加古川ではNO₃-Nは60%程度を占めている。

PO₄-Pの割合は、加古川、揖保川で60~70%程度で比較的高い。

6. 結 語

本稿では、富栄養水域へ流入する汚濁負荷量算定のための、計画パラメーターとしての流達率を明らかにする目的で、情報検索や、3河川の長期にわたる流達率調査の結果について報告した。

ここで、本研究によって得られた成果を要約する。

① 十分な水質調査により求められた流達負荷と著者の方法により求めた排出負荷を対応させた総括流達率は表-18にまとめるとおりであり、全体として妥当な結果が得られている。

② 大河川の場合には、流達率を流出率と流下率に分けて考え、流出率を状況に応じて0.7~1.0とし、流下率を流下距離の指数関数として表わし、式(6)によって流達負荷を推定する方法が合理的であり、また一般に適用できる可能性のあることを明らかにした。

③ 大河川においては、流量と負荷量は広い範囲にわたって直線的な関係にあり、負荷量が流量によってほぼ決定される。流量にかかわらず、それぞれ流域内の人為活動を反映した水質が比較的安定して保たれることは興味ある現象である。

④ 流達負荷に占める溶解性成分の割合はCODで70%, N 85%, P 65%前後であり、降雨によって流量が増大する時期には特にPについてSS性成分の割合

表-18 COD, N, Pの総括流達率

	流域面積 (km ²)	流達率 (%)		
		COD	N	P
塩田川	5.1		87	79
揖保川	809	74	78	80
加古川	1639	88	73	69
厚東川	324	110	65	54
		256	155	182
琵琶湖出*	3120	28	44	41
山王川**	12.5	70	66	77
團部川**	7.8	57	86	87
恋瀬川**	209	66	88	56

* 国松 (1981) ** 建設省 (1973)

が高くなることを明らかにした。

今後の課題としては、

- ① 年降雨量と年平均流達率の関係を明らかにする。
- ② 自然性負荷の合理的な取扱いと降雨時負荷の評価
- ③ 河川の流域特性の流達率への反映

などが考えられる。これらの点については、その後、各方面で情報が蓄積されつつあり、著者らも研究を継続中である^{24), 25)}。

具体的な方法論としては、原単位計算による排出負荷算定、タンクモデルによる流量算定、堆積・掃流モデルからなるポルトグラフシミュレーションを行うことにより、結果的に、流達率に及ぼす降雨量や流域特性の影響の評価が可能となるものと考えられる。

自然性負荷の取扱いについては、流量によって若干変動するバックグラウンド水質を想定し、これを流達水質の実測値から控除して、人為的な排出負荷との関連を論ずる方法が合理的であろう。

これらの課題については、稿を改めて報告する予定である。

このような研究は労多く、功少ない性格のものであるが、今後各方面でデータの蓄積がなされて流達率のより体系だった理論化が進められ、水質管理に活用されることが期待される。

謝 辞：おわりに臨み、分析やデータ整理に協力いただいた研究室の関係者に厚く感謝し、また採水に協力いただいた、新日鉄玉子橋ポンプ所、鐘化高砂事業所の方々、計算処理にご協力いただいた、佐藤昭久氏（新日鉄）、五藤賢二氏（現・新日本気象海洋）、水船清司氏（現・東京設計）、ならびに当研究室の関根雅彦氏、山本修司氏に心から感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 海老瀬潜一・宗宮 功・大楽尚史：市街地河川流達負荷量変化と河床付着性生物群（1），用水と廃水，Vol. 20, pp. 1447~1459, 1978；同上（2），用水と廃水，Vol. 21, pp. 183~191, 1979。
- 2) 海老瀬潜一ほか：タンクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析，用水と廃水，Vol. 21, pp. 1422~1432, 1979。
- 3) 山口高志・吉川勝秀ほか：河川の水質・負荷量に関する水文学的研究，土木学会論文報告集，第 293 号，pp. 49~63, 1980。
- 4) 海老瀬潜一：霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価，国立公害研究所報告，第 21 号，pp. 1~111, 1981。
- 5) 市川 新：多摩川における水質シミュレーションとその問題点，日本水質汚濁研究発表会講演集，第 15 回，

- pp. 157~162,
- 6) 川島博之・鈴 〆 都市河川における有機汚濁物質の分解と蓄積，水質汚濁研究，Vol. 6 (4), pp. 213~220, 1983。
 - 7) 和田安彦：都市河川の堆積物とその負荷の評価，環境問題シンポジウム講演論文集，第 8 回，pp. 124~129, 1980。
 - 8) 小林節子：河川の汚濁負荷に及ぼす着生微生物の影響，日本水質汚濁研究発表会，第 15 回，pp. 145~150, 1981。
 - 9) 河原長美ほか：年間総流出汚濁負荷量の推定法に関する研究，水道協会雑誌，Vol. 53 (2), pp. 38~44, 1984。
 - 10) 山本哲也・勝村陽子：巴川における汚濁物質の流出量とその変動特性について——霞ヶ浦流入河川の流出負荷量実態調査第 3 報——，水質汚濁学会講演集，Vol. 18, pp. 90~91, 1984。
 - 11) 村上 健：河川の自浄作用および汚濁負荷の流出率について，衛生工学研究討議会講演論文集，第 15 回，pp. 1~10, 1968。
 - 12) 稲場紀久雄ほか：汚濁負荷流出率の実態調査，下水道研究発表会，第 9 回，pp. 221~224, 1972。
 - 13) 浮田正夫ほか：小河川における N, P 流達率に関する研究，衛生工学研究討議会講演論文集，第 12 回，pp. 114~120, 1976。
 - 14) 国松孝男：文部省科学研究「びわ湖とその集水域の動態」昭和 55 年度報告，pp. 82~105, 1981。
 - 15) 小林節子ほか：生活排水による水域の汚濁（Ⅱ），公害と対策，Vol. 14 (2), pp. 79~91, 1978。
 - 16) 和田安彦ほか：中小河川における汚濁負荷流出特性，水質汚濁研究，Vol. 4 (1), pp. 9~17, 1981。
 - 17) 青山 勲ほか：農村環境における汚濁物質の流出と広域水質管理に関する一考察，衛生工学研究論文集，Vol. 19, pp. 42~47, 1983。
 - 18) 海老瀬潜一：晴天時と降雨時流出を併せた土地利用形態別流出負荷量原単位，京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム講演論文集，Vol. 6, pp. 152~158, 1984。
 - 19) 流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説 昭和 55 年，建設省編，日本下水道協会刊。
 - 20) 和田安彦：河川管理計画における汚濁流達率の研究：衛生工学研究討議会講演論文集，Vol. 14, pp. 40~45, 1978。
 - 21) 富栄養化防止下水道整備基本調査報告書，建設省都市局下水道部編，日本下水道協会刊，1984。
 - 22) 浮田正夫：わが国における窒素・リンの発生源構造と富栄養化の機構に関する基礎的研究，1983。
 - 23) 浮田正夫ほか：窒素・リン分析における種々の問題点について，用水と廃水，Vol. 21 (2), pp. 18~36, 1979。
 - 24) 浮田正夫ほか：河川の汚濁負荷流達率に関する研究（その 4），第 35 回土木学会中四国支部学術講演会一般講演概要集，pp. 149~150, 1983。
 - 25) 浮田正夫ほか：河川の汚濁負荷流達率に関する研究（その 5），第 39 回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅱ，pp. 743~744, 1984。

(1984. 4. 28・受付)