

(9) 揖保川のポルトグラフシミュレーション

POLLUTEGRAPH SIMULATION FOR IBO RIVER

関根 雅彦 ・ 浮田 正夫 ・ 山本 修司 ・ 中西 弘

Masahiko SEKINE*, Masao UKITA, Shyuji YAMAMOTO, Hiroshi NAKANISHI

ABSTRACT ; The estimation of pollutant load is an essential factor for assessments and effective managements of environmental water quality. This study describes the modelling for predicting the inflowing load of pollutant through rivers into eutrophic lakes and inner sea areas. The model is composed of three stages : discharging load prediction, flow-rate prediction, and inflowing load prediction. The runoff process is considered in different manners by weather conditions. That is : the remainder of pollutant load which does not runoff and accumulates in the watershed during fine weather, is considered to be washed out in rainy weather. The pollutant load, discharged in the basins, is estimated by using unit loading method, and the hydrograph which is necessary for the formulas to predict the wash-out load, was obtained by tank model method. There have been many studies, dealing with water quality and load of pollutant in rivers. However, only a few of these studies analyzes the relationship of human activities in the river basins quantitatively. Using this model, a computer program for pollutegraph simulation was constructed and applied to Ibo Riv. (810 km) in Hyogo prefecture. The results obtained showed a good accordance with the results of field investigations.

KEYWORDS ; Water ; river, model, simulation, hydrograph, pollutegraph, eutrophication, prediction, unit loading, tankmodel

1. はじめに

閉鎖性水域や内海、近海の富栄養化現象の予測が各方面で研究されている。河川は、それら富栄養化水域への汚濁負荷の主要な流入経路である。水域への汚濁負荷流入量を予測しようとした場合、これまで河川から水域への流入負荷量を単に流量の関数にとらえた $L=kQ^n$ モデルが一般的に用いられてきた。しかしこのモデルは、ある特定地点における継続調査に基づいた統計的な負荷量予測にすぎず、流域の人間活動とのむすびつきという視点が欠けている。そのため実際の汚濁負荷制御に役だてようとした場合、どの排出を抑えれば水質はどうなるのか、という問になんら有効な解答をあたえなかった。

筆者らはこれまで、家庭や工場からの汚濁負荷排出量や、河川の汚濁負荷流出機構について実測調査に基づいて解析を試みてきた。本報告ではこれらより得た情報に基づき、人為的要因で発生した負荷が河川に流出し、さらに河口部に流下する過程をモデル化し、汚濁負荷制御に利用しうるモデルを提案した。また、こ

* 山口大学工学部 Yamaguchi University, Faculty of Engineering

のモデルを兵庫県の揖保川流域に適用し、モデルの利用可能性を示した。

2. モデルの構成

モデルの構成を図1に示す。モデルは(1)原単位計算による流域内発生負荷量の予測 (2)タンクモデルによる河川の流量予測モデル (3)負荷の流達過程をモデル化した掃流モデルの3つのサブモデルから成っている。これまで汚濁負荷流出機構のみに注目したモデルは多く存在するが、本研究の特徴は、汚濁負荷流出モデルを1つのサブモデル

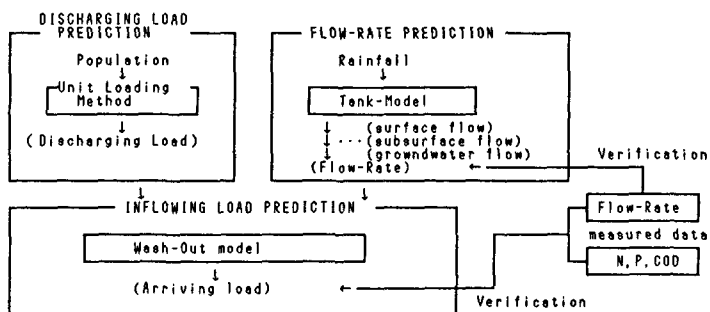


Fig. 1. OUTLINE OF MODEL

ルとしてとらえ、このサブモデルへの汚濁負荷量の入力として、原単位計算を用いた点である。これにより、たとえばある下水道整備計画の効果を知りたい場合、原単位計算における関連する原単位あるいは発生源基数を計画実施後の値に変更して計算することにより将来水質の予測が可能であり、「河川の汚濁負荷量をいくらか引き下げるためには、流域内の工場の排出量をどのくらいに押えれば良い。」といった、実的な指針を得ることが可能となる。

以下に個々のサブモデルについて述べる。

(1) 排出負荷予測

筆者の1人は長年N, P, CODの排出負荷原単位の計測を手掛けてきた。本研究に用いた原単位はこの成果によっている。¹⁾

一般に汚濁負荷発生源は、工場や下水処理場のような特定発生源(点源)と田畑や山林、あるいは舗装路面といった不特定発生源(面源)に分類できる。家庭からの排出は、点源ととらえる場合と面源ととらえる場合がある。本研究では、後に述べる掃流モデルとの関係から、晴天時にも流出する発生源を点源、降雨時しか流出しない発生源を面源としたため、家庭排水は点源ととらえた。また、面源では、施肥により人為的な汚濁負荷発生源となる水田および畑に注目した。山林原野からの負荷は、人為によらないものとして一括して考え、都市域の路面負荷などは、今回は考慮しなかった。

以上の考えに基づき、表1に示す原単位の各項目につき、対象流域の発生源基数を各種統計より求め、排出負荷量を予測した。この際、点源由来排出負荷、水田由来排出負荷、畑由来排出負荷に分類し、点源由来排出負荷は家庭下水と工業排水に家畜汚水の豚の尿を加えた。点源由来排出負荷は毎日、一定量が排出されるものとした。また、水田由来排出負荷は米作による肥料流出とし、施肥期間を6月から9月までとした。畑由来の排出負荷は、自家処分のし尿と家畜汚水の大部分ならびに畑作物の肥料流出である。また施肥は通年平均的になされるものとした。なお、表に上がっていない特殊な業種については、新たな実測調査が必要な場合もある。この外に、河川水には人為的影響が無くても、地質等によって、ある最低水質濃度が存在すると考え、これをバックグラウンド水質濃度として掃流計算から除いて考えた。

(2) 流量予測

3槽のタンクモデルによって、降雨データから日単位の流出高を予測した。各槽からの流出量は、上槽から表面流出 R_A 、中間流出 R_B 、基底流出 R_C として求め、以下に述べる掃流モデルに用いた。

(3) 流達負荷予測

掃流モデルは、次のような現象をモデル化したものである。“流域内に発生した排出負荷のうち点源由来の排出負荷は、平水時に平水時流出率の割合で河川に流出する。そして降雨などの増水時に、流域内に堆

積した物や、水田、畑内の汚濁負荷が掃流されて出てくる。河川に流出した負荷は、平水時には流下率の割合で流下する。そして増水時には流量増加に伴って、河床堆積物が掃流される。”

この汚濁負荷流達機構をモデル化するにあたっては、汚濁負荷の流達過程を、発生源から側溝や小河川、あるいは地表面を経て本川まで流出する流出過程と、本川を流下して海域や湖沼に至る流下過程に分けて考えた。

流下過程、流出過程ともに平水時には自然浄化や堆積等のため、ある流出率、流下率をもつ。この場合の流出率、流出率は、通常 $f=e^{-k_1t}$ のような時間の関数として表現される場合が多いが、本研究では実際の利用上の便宜から地図上で求められる流下距離 X を用いて $f=e^{-k_2X}$ という形を用いた^{2,3,4)}。

この表現では、 k には河床勾配あるいは流下時間等が含まれる事になり、時間微分で表した微分方程式によるモデル表現はそぐわない。本研究では、時間スケールを検証データの得やすい日単位とし、モデル式は差分形式で表現することとした。これより、平水時の流出、流下過程は次式で計算される。

$$\begin{aligned} L_A(t) &= L_0(t) \cdot f & \cdots \cdots \cdots (1) \\ L_S(t) &= L_0(t) \cdot (1-f) & \cdots \cdots \cdots (2) \\ LL_S(t) &= LL_S(t-1) + L_S(t) & \cdots \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

ここに

- $L_A(t)$: 流出, 流下負荷量 (kg/day)
- $LL_S(t)$: 堆積量 (kg)
- $L_S(t)$: 堆積負荷量 (kg/day)
- $L_0(t)$: [流出過程] 点源排出負荷量 (kg/day)
- [流下過程] 流出負荷量 (kg/day)
- f : [流出過程] 流出率 $e^{-k_1 \cdot \sqrt{B}}$
- [流下過程] 流下率 $e^{-k_2 X}$
- B : 流域面積 (km²)
- X : 流下距離 (km)
- k_1, k_2 : 減少係数

Table 1. DISCHARGING UNIT LOADING

source	frame (kind of source)	unit loading		
		COD	N	P
point source	residential nightsoil (g/man/day)			
	sewage treatment	3.75	6.63	.684
	combined treatment (community plant)	4.5	6.12	.798
	separate treatment (cesspool)	9	8.67	.969
	vacuum collection and treatment	2.7	5.97	.57
	private land disposal	.27	.184	.023
	residential miscellaneous waste water (g/man/day)			
	sewage treatment	4	1.3	.372
	combined treatment	4.8	1.2	.434
	without treatment	16	2	.62
	industrial waste water (kg/day/(10 ³ yen/year))			
	food-processing	2	.77	.13
	textile(fiber)	2.5	.35	.1
	textile(clothing)	.2	.05	.01
	woodworking	.2	.05	.01
	furniture	.2	.05	.02
diffused source (from farm)	pulp,paper	5	.5	.01
	printing,publishing	.1	.04	.005
	chemical	3	1.6	.12
	coal,petrochemical	0	0	.03
	rubber	.4	.1	.01
	tannery	10	3.7	.05
	pottery	.2	.04	.004
	iron and steel	.1	.025	.002
	non-ferrous metal	.5	.2	.01
	metal-processing	.1	.035	.026
	machinery	.1	.035	.026
	electrical machinery	.1	.035	.026
	transport machinery	.1	.035	.026
	precision machine	.1	.035	.026
	etc.	.3	.03	.003
diffused source (from paddy)	livestock waste water (g/head/day)			
	pig(urine)	.08	.015	.0009
	livestock waste water (g/head/day)			
	pig(dung)	.07	.018	.012
	cattle	.53	.18	.025
	fowl(pre 1000 fowls)	6.7	2.25	.75
	fertilizer effluent (kg/ha/year)			
	wheat	1140	162	57
	potato	1560	183	78
	bean	720	60	36
	vegetable	2300	276	115
	fluit	1660	219	83
	tea	760	198	38
	mulberry	600	125	30
	feed	1000	104	50
	etc.	454	93	22.7
	fertilizer effluent (kg/ha/year)			
	rice	740	85	37

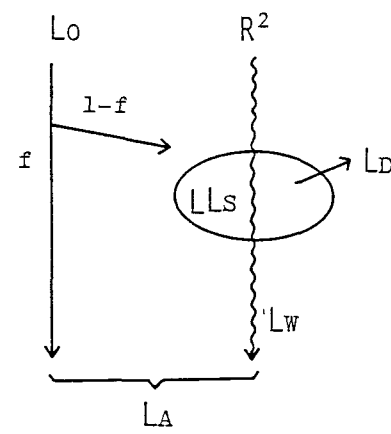


Fig. 2. WASH-OUT MODEL

t : 日単位の時間ステップ

である。

ただし流出過程における畑の排出負荷は、全量堆積することとし、水田については排出負荷量に流出係数 α をかけた量が漏水となり残りが堆積するとした。

また実際は堆積物中のいくらかは、分解、生物への吸収などによって、水域から系外へ消滅する。しかし流出率、流下率を“堆積率”，“消滅率”というように分ける事ができないので、一度流出率、流下率の割合で全て堆積させ、堆積物より系外へ損失するとした。系外損失係数を k_D とすれば、時間 t の堆積量は結局次式のようになる。

$$LLS(t) = LLS(t) (1 - k_D) \dots\dots\dots (4)$$

一方、雨天等の増水時には、平水時に堆積した物質が流出高にに応じて掃流を受ける。これを次式で表現した。

$$L_W(t) = k_W \cdot LLS(t-1) \cdot R^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$LLS(t) = LLS(t-1) - L_W(t) \dots\dots\dots (6)$$

$$L_A(t) = L_0(t) f + L_W(t) \dots\dots\dots (7)$$

ここに $L_W(t)$: 堆積物からの掃流負荷量 (kg/day)

k_W : 掃流係数 (day/m²)

R : 降雨流出高 (mm)

[流出過程] ($R_A(t) + R_B(t)$)

[流下過程] ($R_A(t) + R_B(t)$) $\cdot A/A_*$

$R_A(t)$: タンクモデル 1 段目からの流出高 (mm)

$R_B(t)$: タンクモデル 2 段目からの流出高 (mm)

A : 流域面積 (km²) A_* : 河床面積 (km²)

以上より、人為的影響による河川の水質濃度 C_A (mg/l) は次式のようになる。

$$C_A(t) = L_A(t) \cdot 1000 / Q(t) \dots\dots\dots (9)$$

ここに $Q(t)$: 河川流量 (m³/day) = ($R_A(t) + R_B(t) + R_C(t)$) $\cdot A \cdot 10^{-8}$

この C_A を山林原野等からの人為によらない自然性負荷からなる河川本来のバックグラウンド水質濃度 C_0 (mg/l) に上乗せしたものが河川の水質濃度 C となる。

$$C(t) = C_A(t) + C_0 \dots\dots\dots (10)$$

以上を図 2 に示す。

このモデル式を実際の河川に適用するにあたっては、流域を流下過程を表現する「ブロック」と、ブロック内に含まれ、流出過程を表現する「サブブロック」に分割し、サブブロック、ブロックそれぞれに以上述べた堆積・掃流機構を考えた。(図 3) サブブロック内では原単位計算による排出負荷量が(1)式における L_0 にあたり、ブロック内ではサブブロックからの流出負荷量および上流のブロックからの流下負荷量が L_0 にあたる。最下流ブロックの流下負荷量がその流域の流達負荷量となる。ブロックの区分は流量予測における流量検証データが得られる地点が望ましく、また、定められた時間スケール内にブロック上からの流入水がブロックを通過してしまわないような空間スケール

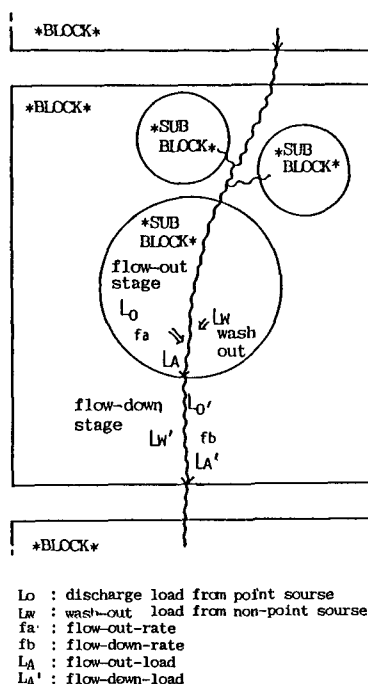


Fig. 3. FLOW-OUT AND FLOW-DOWN STAGE

Table 2. BACKGROUND POLLUTANT CONCENTRATION

	(mg/l)		
	C O D	T - N	T - P
C_0	0.6	0.15	0.015

となるよう注意する。サブブロックは排出負荷量をとりまとめる最小単位であるため、発生源基数等の統計資料が得やすい区分となるよう配慮する必要がある。普通、市町村の行政区分は分水嶺に沿っていることが多く、市町村をサブブロックとすれば、河川流域の区分がスムーズにいく。流出高は各ブロックごとに求める。

3. 揖保川への適用

2で述べたモデルを、兵庫県の揖保川流域に適用した。解析期間は昭和54年8月8日から昭和55年8月7日までの1年間である。図4に、揖保川の流域区分と諸元を示す。揖保川は本川と林田川が龍野市南端で合流している。流路延長は本川が34.5km、林田川が16.4kmであり、流域面積は824km²である。サブブロック分割の際、複数のブロックにかかる市町村については、排出負荷量は面積比でふり分けた。

流量解析については、雨量は三方、神戸の雨量観測所のデータを用いた。また、検証流量は山崎、構の流量観測所のデータを用いた。ⅠブロックとⅢブロックについては神戸と三方の降雨量の平均を用いて計算し、Ⅱブロック、Ⅳブロックについては神戸の降雨量を用いた。掃流モデル検証用水質データは林田川合流後、上川原までの中間に位置する王子橋工業用水取水点における毎日水質データである。掃流モデルの初期堆積量は1年間の計算結果より、1年後の堆積量を初期値として与えた。バックグラウンド水質濃度は、山林からの流出負荷の文献値^{2, 3, 4)}および調査値より、平均から大きく異なる値を除いた最低値を採用した。(表2)パラメータの値は表3に示した。このうち晴天時における流出率、流下率の減少係数は著者らの別報^{5, 6)}から引用した。面源負荷の点源流出係数 α は0.01~0.001を目安に変化させた。掃流係数については100mmの降雨に堆積物の掃流が100%になるようにした。系外損失係数は施肥量からの平均的な排出率や作物への吸収率などから目安となる値を定め、トライアルにより設定した。流出過程と流下過程の掃流係数の関係はAとA_{*}の比を用いた。

排出負荷量の算定結果を表4に示す。タンクモデルのパラメータは試行錯誤により図5のように決定した。これらは各ブロック共通に使用した。流量検証データとの比較を、図6に示した。この流域全体の流量については実測データと計算値の相関係数が0.83と高くタンクモデルの計算値は掃流モデルに十分適用できると判断した。

以上のパラメータ、流量、排出負荷を用いて流量解析と同じ期間につき掃流モデルによりボルトグラフシミュレーションを行った。Nについての検証データと計算値の比較を図7に示した。

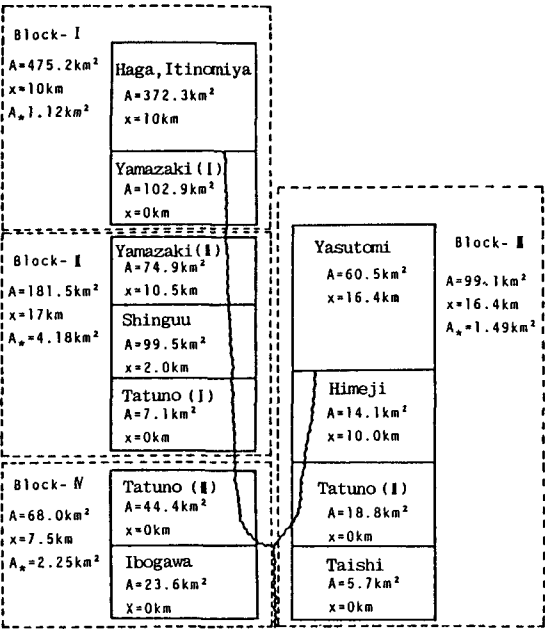


Fig. 4. BLOCKS AND SUB-BLOCKS IN THE BASIN OF IBO RIV.

Table 3. PARAMETERS OF WASH-OUT MODEL

		k1 ,k2 (1/km)	Ku (day/m2)	COD	Kd (1/day)	(1/day) N	P
Flow out stage	Point	.2	.0001	0	.02	.005	
	Paddy	.001	.0001	0	.25	.1	
	Farm	0	.0001	0	.25	.1	
Flow down stage		.2	.000001	0	.02	.005	

P, C O Dでも同様の結果が得られている。図 7 では、実測値に大きな変動があり、計算値との差異が大きくなる場合が散見される。これは採水地点の直上に皮革工場があり、この工場からの排水が不定期であることに起因すると考えられる。この実測値の変化を再現するには点源排出負荷量に年間一律の値ではなく、日変化をつけなければならない。しかし、全体的な傾向としては実測値に計算値が良く追従しており、モデルは妥当であると考えられる。

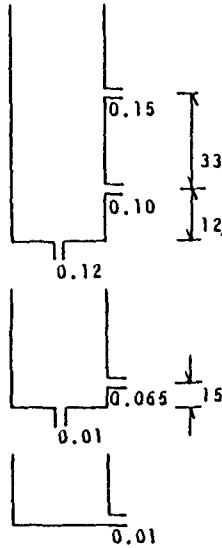


Fig. 5. TANK MODEL

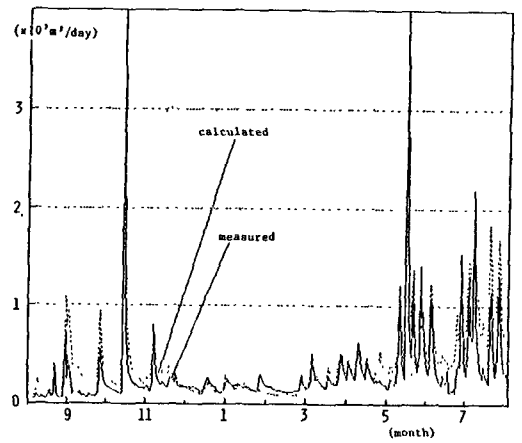


Fig. 6. HYDROGRAPH

4. おわりに

原単位計算、流量予測、掃流モデルを組み合わせた汚濁負荷制御に利用可能なボルトグラフシミュレーションモデルを提案し、実際の河川に適用した。現在、掃流係数や河末内堆積物、硝酸性窒素の挙動について実測調査に基づき検討中であり^{7,8)}、ほかに系外損失係数、流出率、流下率など理論的に詰めなければならない点も多く残されているが、モデルの大きな枠組みは示し得たと考える。モデルを作成する場合には、求められる精度とモデル構成の複雑さのバランスを十分考慮しなければならない。原単位計算を出発点にする今回提示したモデルにより、初期の目的にかなう程度の負荷量予測は十分可能であると言える。

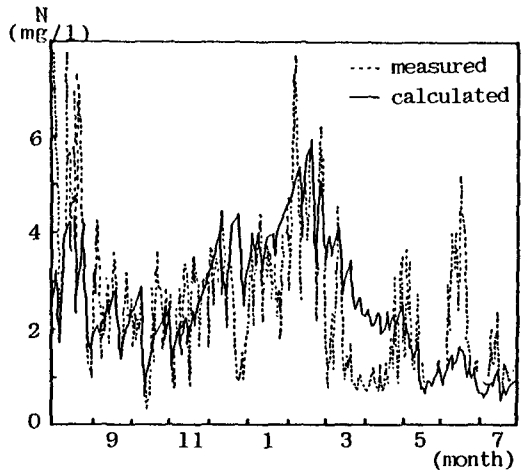


Fig. 7. AN EXAMPLE OF POLLUTEGRAPH

Table 4. DISCHARGING LOAD

		(kg/day)								
Block	Sub Block	C O D			T - N			T - P		
		Point	Paddy	Farm	Point	Paddy	Farm	Point	Paddy	Farm
1	Haga, Ichinomiya	469	1589	3846	162	185	552	22	79	102
		552	1024	2264	158	119	298	43	51	71
2	Yamazaki(2)	427	792	1750	176	92	231	48	40	55
		648	1394	3004	209	162	424	30	70	82
3	Tatuno(1)	298	305	637	298	35	85	26	15	2
		143	421	1064	33	49	161	5	21	31
3	Yasutomi	180	507	1066	23	59	128	4	25	28
		505	1160	2113	232	135	232	17	58	39
4	Tatuno(2)	12364	967	2023	1864	112	268	70	48	7
		1164	1658	3469	2661	193	460	100	83	11
4	Ibogawa	365	855	1910	104	99	224	20	43	45

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 和田和彦：河川上流部の自然負荷の定量化とその特性，用水と排水，pp438～448, Vol 20 No. 4, 1978.
- 3) 富栄養化対策調査報告書 諏訪湖地区，関東農政局，1979.
- 4) 戸原義男 他：自然系汚濁負荷の流出予測モデル，佐賀大学農学部彙報集，No. 55, 1983.
- 5) 浮田正夫 他：河川の汚濁負荷流達率に関する研究（その6）晴天時における減少係数について，第37回土木学会中四国支部学術講演会一般講演概要集，pp 79～80, 1985.
- 6) 浮田正夫 他：河川の汚濁負荷流達率に関する研究，土木学会論文集Ⅱ第357号，pp225～234, 1985.
- 7) 関根雅彦 他：河川水質解析における河床堆積物評価 一水草帯堆積物について一，第40回土木学会年次学術講演概要集Ⅱ，1985.
- 8) 山本修司 他：河川水質解析における河床堆積物評価 一易掃流堆積物について一，第40回土木学会年次学術講演概要集Ⅱ，1985.