

〈論文〉

流域特性を考慮した流送能力型汚濁流出モデルの開発

奥 川 光 治* 宗 宮 功** 大 西 行 雄***

Development of a Pollutant Runoff Model with Constants Considering Watershed Characteristics-for a Regression Model of River Load on Discharge

Koji OKUGAWA*, Isao SOMIYA** and Yukio OHNISHI***

* Department of Environmental Technology, College of Technology, Toyama Prefectural University, Kurokawa, Kosugi-machi, Imizu-gun, Toyama 939-03 Japan

** Department of Environmental and Sanitary Engineering, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606 Japan

*** Lake Biwa Research Institute, 1-10, Uchide-hama, Otsu, Shiga 520 Japan

Abstract

Regression models for the k and n values of the $L=kQ^n$ -type pollutant runoff model (L : specific load, Q : specific discharge, k and n : constants) were developed. In the models, the independent variables are several watershed characteristics etc.

The relation between the k value and several watershed characteristics was analyzed using the data on 14 rivers with 17 stations as well as the n value. According to multi-regression analyses for the k and n values, it was found that (1) for the k value a correlation coefficient of a regression model was large even if discharged load was an only independent variable and (2) for the n value a correlation coefficient of a regression model was large when the k value or discharged load which had a strong correlation with the k value was included as an independent variable.

Regression models for estimating the k and n values were selected from the results and verified by observed data. According to the verification, the estimated k and n values ranged from half of the observed values to twice of those at most of the stations as well as the estimated load which was calculated by the estimated k and n values.

Key words: eutrophication, pollutant runoff model, constant, watershed characteristics, regression model

1. 結 論

1.1 研究目的

現在、富栄養化現象をはじめとする閉鎖性水域における水質の季節変動の解明あるいは予測を目的として、生態系モデルを中心とした数理モデルが利用され

ている^{1),2)}。しかし、利用上の問題点の1つとして、流入負荷量をいかなるモデルで与えるかという問題がある。この場合、流入負荷モデルが満足すべき必要条件としては、(1)モデルの目的から、日変化ないしは月変化程度の時間変化を表現できること、(2)モデルの実用性を考慮すると、流域からの排出負荷量の管理など環

* 富山県立大学短期大学部環境工学科 〒939-03 富山県射水郡小杉町黒河

** 京都大学工学部衛生工学科 〒606 京都市左京区吉田本町

*** 滋賀県琵琶湖研究所 〒520 大津市打出浜 1-10

境管理施策と対応させて流入負荷量が予測可能であること、(3)流量と負荷量に関して詳細な実測調査がなされていない河川にもモデルが適用可能であること、の3点が挙げられる。

現在、利用されている流入負荷モデルとしては原単位法と汚濁流出モデルとがある。原単位法で推定可能なのは年平均の流入負荷量であり、流入負荷モデルの必要条件(2)(3)は満たしているが、必要条件(1)を満足していない。一方、汚濁流出モデルには山口ら³⁾の分類による流送能力型モデル、流送能力・供給関数型モデル、さらには、いわば流出過程追跡型とでも呼ぶべきモデルなどがある。各モデルの詳細については1.2で述べるが、いずれも流入負荷量を流量その他の変数の関数としているため時間変化を表現することができ、必要条件(1)は満たしている。しかし、必要条件(2)については一部のモデルで環境管理施策と対応づけがなされているにすぎない。また、いずれのモデルも実測データに基づいて定数値が決定されるので必要条件(3)を満足していない。

本研究では、 $L=kQ^n$ 型(L は比負荷量、 Q は比流量、 k 、 n は定数)の流送能力型汚濁流出モデルに着目し、 k 、 n 値を目的変数、種々の流域特性を説明変数とする回帰モデルを確立することを試みる。 $L=kQ^n$ 型モデルの場合、必要条件(1)は満たしているので、回帰モデルを使って流域特性により k 、 n 値を推定することが可能になれば、必要条件(2)(3)も満たすことになる。

1.2 各種汚濁流出モデルの比較

流送能力型モデルは流出する汚濁負荷量を降雨量と流量の関数として表現したものであり、代表例としては $L=kQ^n$ 型モデルがある。このモデルは構造が簡単

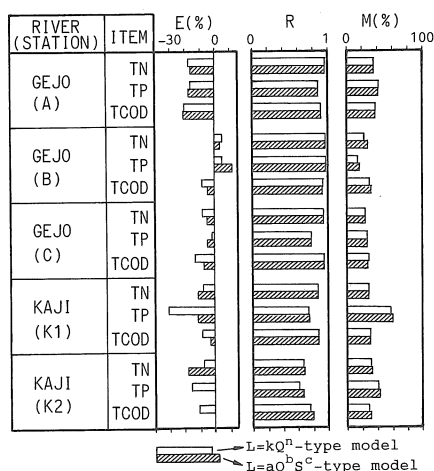


Fig. 1 Comparison between the $L=kQ^n$ -type model and $L=aQ^bS^c$ -type model

で、パラメータ数が少なく、その値は最小自乗法で容易に決定することができる。しかし、流量と負荷量の連続的な測定値が示す L - Q 曲線のループ特性を考慮していないという欠点を有する⁴⁾。流送能力・供給関数型モデルは、その欠点を改良するため負荷量ポテンシャル(堆積量) S を導入し、流域に堆積している汚濁物質の変化を考慮したものであり、流出機構をより現実に近い形で表現している。代表例としては $L=aQ^bS^c$ 型モデル³⁾がある(a 、 b 、 c は定数)。しかし、負荷量ポテンシャルの物理的意味の曖昧さや観測の困難さ、初期設定値の妥当性が問題である。流出過程追跡型モデルは、原単位と流出過程を表現する流出率や掃流係数あるいは土地利用別タンクモデル等を用いて、流出機構をさらに忠実に表現したものである。代表例として関根ら⁵⁾および浮田ら⁶⁾のモデルがある。このモデルでは流域の環境管理施策と対応させて流出負荷量の予測が可能であるが、未知パラメータの決定が困難である⁷⁾。

以下では、 $L=kQ^n$ 型モデルと $L=aQ^bS^c$ 型モデルの推定精度を流量と負荷量に関する実測データを使って比較してみる。Fig. 1 は、両モデルの推定精度を示したものである。ここに、 R は実測負荷量と推定負荷量の相関係数、 E は計算期間内の総負荷量の相対誤差 ($E = \{ \sum_i L_e(i) - \sum_i L_o(i) \} / \sum_i L_o(i)$ 、添字 e は推定値、 o は実測値であることを、また、 i は i 番目の計算ステップであることを示す)、 M は山口ら³⁾の定義した計算期間内の総負荷量に着目した平均誤差率 ($M = \sum_i W(i) \cdot |L_e(i) - L_o(i)| / \sum_i L_o(i)$ 、 $W(i) = L_o(i) / \sum_i L_o(i)$ である。使用したデータは、下条川と鍛冶川5地点の実測データであり、2. で詳細を示す。 $L=kQ^n$ 型モデルの定数 k 、 n 値については最小自乗法により決定した。一方、 $L=aQ^bS^c$ 型モデルは、 S が、初期堆積量 S_0 と負荷量の供給関数 S_{in} (ここでは一定とする) とにより、 $S = S_0 + \int_0^t \{ S_{in} - L(t) \} dt$ で表されるので、5つの定数値 (a 、 b 、 c 、 S_0 、 S_{in}) を決定する必要がある。

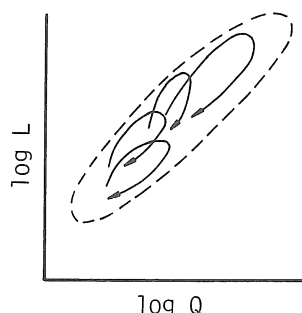


Fig. 2 Loop characteristics of L - Q curve

ある。 S_0 , S_{in} は山口ら³⁾が示した, S_{in} =(日流出負荷量の平均値), $S_0=20 \times S_{in}$ で求め, a , b , c は最小自乗法で決定した。

図から, (1)平均誤差率と相関係数は両モデル間ではほとんど差がないこと, (2) $L=aQ^bS^c$ 型モデルの相対誤差が $L=kQ^n$ 型モデルと比べて必ずしも小さくないことがわかる。これは山口ら³⁾の計算結果にも見られるところであり, 次のように考えることができる。つまり, $L-Q$ 曲線のループ特性は単一出水に対してとくに認められるものであり, 本研究のように長期間の水質変動を扱う場合は, Fig. 2 に示すように, 各出水のループがグラフ上で散らばるため, 全体としてはループ特性が不明瞭になり, $L-Q$ 間の相関が高くなる, したがって, $L=kQ^n$ 型モデルと $L=aQ^bS^c$ 型モデルの推定精度の差があまり認められなくなるものと考えることができる。

1.3 本研究の基本的立場

(1) $L=kQ^n$ 型モデルに着目する理由

第1に, モデルの構造が簡単で, パラメータ数が少なく, 実用的であることである。とくに, 本研究では閉鎖性水域の水質変動を数理モデルにより解析する場合の流入負荷量推定を念頭においているので, 簡単で実用的なモデルを指向している。第2に, $L-Q$ 曲線のループ特性に未配慮という欠点があるにもかかわらず, 前節で示したように, その点を改良した $L=aQ^bS^c$ 型モデルと推定精度にあまり差がないことである。以上のように, 推定精度が同程度であれば簡単で, 実用的なモデルを使うのが本研究の立場である。

(2) k , n 値の物理的解釈

k , n 値は流量, 負荷量に関する実測データを統計処理して求められる。すなわち, k 値は $x=\log Q$, $y=\log$

L としたときの回帰直線の y 切片である。よって, $Q=1$ が Q の実測データの範囲とかけ離れているときは, 回帰直線の傾き (n 値) の誤差の影響により k 値の誤差が大きくなる可能性がある。本研究では, 解析対象河川の平均比流量が $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ のオーダーであるので, Q の単位として $10^{-2} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ を使用した。したがって, k 値は平均比流量の下限値に対応する負荷量あるいは濃度であり, 流域の地形的特性, 水文特性や社会的特性を反映しているものと考えられる。一方, n 値は回帰直線の傾きであるので, 負荷量あるいは濃度の流量依存性を示している。すなわち, $n > 1$ のときは流量が大きくなると濃度も大きくなる汚濁型であり, $n < 1$ のときは流量が大きくなると濃度が小さくなる希釈型である。 $n \approx 1$ のときは流量の大小にかかわらず濃度が一定となる中間型である³⁾。このいずれの型をとるかは各水質の流域での蓄積特性, 土壤中における反応性や保持特性などにより決まるものと思われ, n 値についても流域の諸特性が反映されているものと考えられる。また, k , n 値は前述したように回帰分析 (最小自乗法) で求められるので, 互いに連動して値が決まるものと考えられる。

2. k , n 値と流域特性との関連解析

2.1 解析方法と使用したデータ

この章では, k , n 値と種々の流域特性との関連解析を行い, さらにその結果から, 流域特性により k , n 値を推定するための回帰モデルを検討する。関連解析は2通りの方法で行う。すなわち, (1) k , n 値と種々の流域特性を変数として, 変数間の単純相関分析を行う。(2) k , n 値を目的変数, 種々の流域特性を説明変数として, 重回帰分析を行う。なお, 重回帰分析については

Table 1 Survey period, frequency of survey and number of data with k and n values

River name (Station name)	Survey period	Frequency of survey (d ⁻¹)	Number of data	TN			TP			TCOD _{Cr}		
				k	n	R	k	n	R	k	n	R
Gejo (A)	1980. 8. 1~1981. 7. 31	1/2	180	0.00807	0.936	0.916	0.000631	0.832	0.859	0.111	0.942	0.913
Gejo (B)	1980. 6. 18~1980. 9. 2	1/2	39	0.00981	0.937	0.929	0.000603	1.05	0.948	0.0845	1.05	0.844
Gejo (C)	1980. 8. 1~1981. 7. 31	1/2	180	0.0127	0.962	0.917	0.00148	0.831	0.874	0.0871	1.12	0.914
Kaji (K1)	1986. 10. 28~1987. 10. 27	1/7	53	0.0208	0.836	0.810	0.000370	1.22	0.716	0.0759	1.21	0.899
Kaji (K2)	1986. 10. 28~1987. 10. 27	1/7	53	0.0289	0.715	0.691	0.00122	0.844	0.644	0.0891	1.09	0.831
Ibo	1979. 8. 6~1980. 9. 30	1/1	422	0.0367	0.504	0.71	0.00107	0.851	0.81	0.172	0.680	0.80
Kako	1979. 8. 27~1980. 9. 30	1/1	401	0.0147	0.959	0.97	0.00133	1.019	0.88	0.105	1.029	0.95
Koto	1979. 6. ~1981. 6	1/1	675	0.00571	1.07	0.93	0.000225	1.24	0.93	0.0576	1.08	0.97
Sakai	1981. 6. 3~1982. 5. 26	1/7	52	0.0399	0.929	0.911	0.00614	0.896	0.821	0.239	0.883	0.670
Sakura	1981. 6. 3~1982. 5. 26	1/7	52	0.0286	1.12	0.911	0.00109	1.15	0.899	0.0992	0.951	0.906
Bizen	1981. 6. 3~1982. 5. 26	1/7	52	0.0529	1.03	0.806	0.0121	0.794	0.821	0.404	0.881	0.735
Hanamuro	1981. 6. 3~1982. 5. 26	1/7	52	0.0722	0.567	0.627	0.00336	0.765	0.696	0.108	1.28	0.855
Seimei	1981. 6. 3~1982. 5. 26	1/7	52	0.0322	1.12	0.859	0.00312	0.890	0.814	0.167	1.05	0.768
Ono	1981. 6. 3~1982. 5. 26	1/7	52	0.0318	1.52	0.833	0.00108	0.870	0.660	0.109	0.934	0.731
Mano	1978. 8. 1~1979. 7. 31	1/1	365	0.00434	1.29	0.976	0.000563	1.08	0.936	—	—	—
Sanda	1978. 8. 1~1979. 7. 31	1/1	365	0.0212	1.08	0.937	0.00490	0.836	0.857	—	—	—
Yasu	1978. 8. 1~1979. 7. 31	1/1	365	0.0120	1.03	0.983	0.00111	1.03	0.966	—	—	—

R: correlation coefficient.

Table 2 Topographical and hydrological characteristics

River name (Station name)	Watershed area (km ²)	Mean of river slope (‰)	Mean of specific discharge (10 ⁻² m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)
Gejo (A)	26.6	16.7	9.44
Gejo (B)	31.6	12.9	9.77
Gejo (C)	35.3	11.0	11.3
Kaji (K1)	9.854	22.8	5.47
Kaji (K2)	12.040	18.9	6.24
Ibo	809	17.6	4.92
Kako	1639	10.8	3.38
Koto	324	16.1	5.125
Sakai	17.6	3.12	1.36
Sakura	330.0	10.5	0.973
Bizen	6.5	3.82	1.32
Hanamuro	34.4	2.00	2.30
Seimei	24.5	2.56	1.47
Ono	120.6	1.07	1.04
Mano	17.02	82.1	4.65*
Sanda	3.59	91.6	4.26*
Yasu	336.80	23.2	9.41*

*: estimate.

奥野らの「多変量解析法」⁸⁾を参考にした。

解析に使用したデータは14河川17地点に関するものであり、詳細は以下のとおりである。A. 筆者らにより調査を実施した富山県の下条川3地点、鍛冶川2地点。B. 浮田、中西⁹⁾による兵庫県の揖保川、加古川、山口県の厚東川。C. 海老瀬^{10),11)}による霞ヶ浦流入6河川。境川、桜川、備前川、花室川、清明川、小野川。D. 國松ら^{12)~14)}による琵琶湖周辺3河川。真野川、三田川、野洲川。

k , n 値の算出にあたっては、1.3で述べたように、 Q の単位のとりに方に留意した。また、 L の単位は $g \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ とした。なお解析した水質項目は総窒素 TN, 総リン TP, 総 COD_{Cr} TCOD_{Cr} であり、COD_{Cr} のデータがない場合は河川水、降水の調査結果から $COD_{Cr} = 2.45 \times COD_{Mn}$ として換算した。ここで、添字 Cr, Mn はそれぞれ2クロム酸カリウム、過マンガン酸カリウムによる COD であることを示す。

Table 3 Social characteristics

River name (Station name)	Population density (capita·km ⁻²)	Area ratio of land-use type (%)			Discharged load (kg·d ⁻¹ ·km ⁻²)		
		Forest	Agricultural area	Urban area and the others	TN	TP	TCOD _{Cr}
Gejo (A)	75.9	66.8	17.9	15.3	3.42	0.100	20.9
Gejo (B)	430.6	57.4	21.3	21.3	5.11	0.268	28.0
Gejo (C)	632.2	51.4	23.9	24.7	6.29	0.491	45.6
Kaji (K1)	207.1	32.6	42.8	24.6	7.53	0.228	33.0
Kaji (K2)	263.7	28.5	47.2	24.3	7.93	0.265	36.7
Ibo	143.1	88	8	4	9.60	0.511	62.9
Kako	247.3	71	16	13	5.61	0.649	37.5
Koto	59.3	79	13	8	2.96	0.175	17.6
Sakai	902	21	46	33	17.2	1.03	85.4
Sakura	281	37	48	15	10.7	0.339	42.9
Bizen	1939	20	31	49	17.9	1.65	144
Hanamuro	1068	20	41	39	18.9	1.14	82.6
Seimei	541	29	54	17	13.1	0.447	49.9
Ono	554	29	52	19	14.6	0.556	59.6
Mano	141.8	79.8	17.9	2.3	3.45	0.343	16.0
Sanda	1242.3	78.3	6.1	15.6	8.77	1.25	66.5
Yasu	250.2	62.4	28.2	9.5	6.01	0.438	45.7

Table 4 Correlation coefficient

k _{TP}	0.594															
k _{TC}	0.535*	0.951*														
ρ _{TN}	-0.383															
ρ _{TP}		-0.490	0.245													
ρ _{TC}			-0.504*	-0.084*	0.216*											
AREA	-0.140	-0.221	-0.121*	-0.161	0.184	-0.265*										
SLP	-0.402	-0.086	-0.466*	0.213	0.121	0.058*	-0.141									
QS	-0.615	-0.453	-0.446*	-0.218	0.063	0.202*	-0.096	0.137								
PPLD	0.645	0.925	0.816*	0.017	-0.565	-0.029*	-0.318	-0.024	-0.389							
FRS	-0.665	-0.445	-0.367*	0.002	0.273	-0.322*	0.430	0.572	0.441	-0.475						
AGR	0.464	0.112	0.081*	0.161	-0.063	0.270*	-0.355	-0.526	-0.462	0.117	-0.892					
OTH	0.703	0.734	0.608*	-0.216	-0.458	0.270*	-0.383	-0.439	-0.263	0.787	-0.802	0.446				
LOADN	0.929		-0.093				-0.226	-0.415	-0.705	0.722	-0.759	0.588	0.727			
LOADP		0.895		-0.555			-0.073	0.044	-0.488	0.940	-0.334	0.001	0.661	0.729		
LOADC			0.898*		-0.290*	-0.165*	-0.618*	-0.540*	0.930*	-0.541*	0.221*	0.762*	0.843*	0.911*		
	k _{TN}	k _{TP}	k _{TC}	ρ _{TN}	ρ _{TP}	ρ _{TC}	AREA	SLP	QS	PPLD	FRS	AGR	OTH	LOADN	LOADP	

*: Number of data = 14
Others: Number of data = 17

各河川の流域特性としては、流域面積 $AREA$ と平均河川勾配 SLP を地形的特性として、平均比流量 QS を水文特性として、さらに、人口密度 $PPLD$ 、各種土地利用面積比率（森林、農地、市街地その他に3分類、それぞれ FRS , AGR , OTH とする）および流域全体から排出される TN , TP , $TCOD_{cr}$ 負荷量（それぞれ $LOADN$, $LOADP$, $LOADC$ とする。一括して示すときは $LOADX$ とする。）を社会的特性としてとりあげた。

以上 k , n 値および流域特性値については文献値を参考にするか各種資料を用いて筆者らが算出した。なお、霞ヶ浦流入河川については、茨城県の整備した「霞ヶ浦水質情報等データベース」も使用した。Table 1, 2, 3 に各地点毎の調査概要と k , n 値、流域特性を示す。

2.2 解析結果および考察

2.2.1 変数間の単純相関分析

(1) k 値と他の変数との相関

Table 4 に各変数間の相関係数を示す。 k 値は排出負荷量と強い正の相関を示し、人口密度、市街地その他の面積比率とも正の相関を示している。このように k 値が汚濁の強度と関連した変数と正の相関を示すのは、1.3で触れたように、 k 値が平均比流量の下限値に対応する濃度であるためと言える。一方、 k 値は森林面積比率、平均比流量と負の相関を示しているが、これは、森林面積比率が大きい場合汚濁の強度が小さいこと、比流量が大きいと希釈の効果があることにより k 値が小さくなることを示している。また、 k_{TN} , k_{TP} , k_{TC} 3変数間では正の相関があり、水質項目間の類似性があることがわかる。

(2) n 値と他の変数との相関

n 値と k 値との間に負の相関が見られるのが最も特徴的である。これは、前述したように、 k , n 値が回帰分析により連動して求められるためと考えられる。つまり、 k 値は低流量（平均比流量の下限値）時の負荷量で決まるのに対し、 n 値は回帰直線の傾きであるので、高流量時と低流量時の負荷量の差で決まる。したがって、流域における汚濁の強度が大きい場合、低流量時では負荷量が大きくなり k 値が大きくなるのに対し、高流量時では希釈効果や自然性の懸濁性物質の挙動の影響も強く受け、負荷量の増大は低流量時ほどではないため、回帰直線の傾き (n 値) が小さくなるものと考えられる。以上の概念を Fig. 3 に示しておく。 n_{TN} , n_{TP} , n_{TC} 3変数間では相関は認められず、 k 値とは違った特徴を示している。これは、水質項目により水質構成（溶解性と懸濁性の割合）が異なることなどにより流量依存性が違うことによるものと思われる。

(3) 流域特性間の相関

第1に、流域面積と相関のある変数はないこと、第2に、人口密度、市街地その他の面積比率、排出負荷量3変数相互の従属性が強いこと、第3に、森林面積比率は農地面積比率、市街地その他の面積比率と負の強い相関を示すとともに、排出負荷量とも負の相関を示すことなどが特徴である。

2.2.2 k 値に関する重回帰分析

Table 5 に解析結果を示す。解析に使用した説明変数は流域面積、平均河川勾配、平均比流量、森林面積比率、農地面積比率および排出負荷量の6変数であり、人口密度と市街地その他の面積比率は排出負荷量と従属性が強いので説明変数から除外した。解析手法としては変数指定法と変数減増法を用いた。変数指定法では、(1)重回帰モデルの実用性を考えて説明変数の数は2または3とし、(2)環境管理施策との対応をつけるため排出負荷量は必ず説明変数に含めることとするとともに、(3) k 値との相関が小さい流域面積は説明変数から除外した。

k_{TN} に関する解析結果について見てみよう。Case KTN1~KTN10は変数指定法による結果である。いずれのCaseも自由度調整済み重相関係数 R^* は大きい、説明変数が排出負荷量1変数のみの場合（変数減増法、Case KTN11）を改善しているとはいえず、排出負荷量の説明能力の大きいことがわかる。また、排出負荷量の偏回帰係数の符号はいずれのCaseでも正であり、排出負荷量が大きくなれば k_{TN} も大きくなることを示しており、前節の相関分析で得られた結果と一致する。

k_{TP} や k_{TC} の場合は k_{TN} と同様の結果が得られている (Table 5 には変数減増法によるCaseのみ示した)。

以上から、 k_{TN} , k_{TP} , k_{TC} を流域特性から推定するた

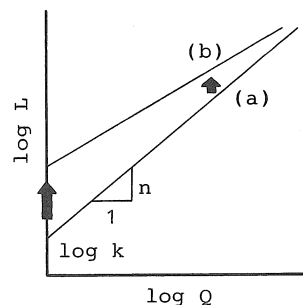


Fig. 3 Determination of k and n values by regression analysis

- (a) Pollution intensity in a watershed is small
- (b) Pollution intensity in a watershed is large

Table 5 Results of the multiple regression analysis for k value

Case No.	Dependent variable	Standard partial regression coefficient						F-value	Level of significance	R*	Number of data
		AREA	SLP	QS	FRS	AGR	LOADX				
KTN1	k _{TN}	—	-0.020	—	—	—	0.920	43.978	0.000	0.918	17
KTN2	k _{TN}	—	—	0.080	—	—	0.985	45.070	0.000	0.920	17
KTN3	k _{TN}	—	—	—	0.095	—	1.001	45.315	0.000	0.920	17
KTN4	k _{TN}	—	—	—	—	-0.125	1.002	47.959	0.000	0.924	17
KTN5	k _{TN}	—	-0.005	0.078	—	—	0.982	27.905	0.000	0.914	17
KTN6	k _{TN}	—	-0.061	—	0.132	—	1.004	28.662	0.000	0.916	17
KTN7	k _{TN}	—	-0.073	—	—	-0.157	0.990	30.725	0.000	0.921	17
KTN8	k _{TN}	—	—	0.102	0.118	—	1.090	29.308	0.000	0.917	17
KTN9	k _{TN}	—	—	0.069	—	-0.120	1.048	30.327	0.000	0.920	17
KTN10	k _{TN}	—	—	—	-0.130	-0.214	0.956	30.236	0.000	0.920	17
KTN11 ^{*1}	k _{TN}	—	—	—	—	—	0.929	93.984	0.000	0.924	17
KTP11 ^{*1}	k _{TP}	—	—	—	—	—	0.895	60.249	0.000	0.887	17
KTC11 ^{*1}	k _{TC}	—	—	—	—	—	0.898	50.031	0.000	0.889	14

—: not used in the analysis. *1: stepwise backward regression (stopping level, 5% and 10%).

Table 6 Results of the multiple regression analysis for n value

Case No.	Dependent variable	Standard partial regression coefficient						F-value	Level of significance	R*	Number of data
		k	AREA	SLP	QS	FRS	AGR				
NTN1	n _{TN}	-0.354	—	0.070	—	—	—	1.241	0.319	0.171	17
NTN2	n _{TN}	-0.830	—	—	-0.728	—	—	6.366	0.011	0.634	17
NTN3	n _{TN}	-0.683	—	—	—	-0.453	—	2.469	0.121	0.394	17
NTN4	n _{TN}	-0.583	—	—	—	—	0.431	2.891	0.089	0.437	17
NTN5	n _{TN}	-2.150	—	—	—	—	—	12.711	0.001	0.771	17
NTN6	n _{TN}	-0.844	—	-0.026	-0.733	—	—	3.949	0.033	0.597	17
NTN7	n _{TN}	-0.672	—	0.294	—	-0.613	—	2.026	0.160	0.402	17
NTN8	n _{TN}	-0.523	—	0.297	—	—	0.559	2.366	0.118	0.452	17
NTN9	n _{TN}	-2.130	—	0.168	—	—	—	8.729	0.002	0.769	17
NTN10	n _{TN}	-1.091	—	—	-0.707	-0.411	—	5.753	0.010	0.686	17
NTN11	n _{TN}	-0.913	—	—	-0.647	—	0.286	5.011	0.016	0.655	17
NTN12	n _{TN}	-2.033	—	—	-0.402	—	—	11.379	0.001	0.813	17
NTN13	n _{TN}	-0.585	—	—	—	-0.008	0.426	1.790	0.199	0.359	17
NTN14	n _{TN}	-2.162	—	—	—	0.042	—	7.894	0.003	0.751	17
NTN15	n _{TN}	-2.111	—	—	—	—	0.065	7.957	0.003	0.752	17
NTN16 ^{*1}	n _{TN}	-2.150	—	—	—	—	—	12.711	0.001	0.771	17
NTN17 ^{*2}	n _{TN}	-2.033	—	—	-0.402	—	—	11.379	0.001	0.813	17
NTP16 ^{*3}	n _{TP}	—	—	—	—	—	—	6.682	0.021	0.512	17
NTC16 ^{*3}	n _{TC}	-1.062	—	—	—	-1.789	-1.221	11.943	0.001	0.846	14

*1: stepwise backward regression (stopping level, 5%). *2: stepwise backward regression (stopping level, 10%). *3: stepwise backward regression (stopping level, 5% and 10%). —: not used in the analysis.

めの回帰モデルとしてはいずれも排出負荷量1変数のみが説明変数であるモデルを採用することにする。

2.2.3 n 値に関する重回帰分析

n 値に関する重回帰分析では k 値の場合に使用した説明変数に加え、 k 値も説明変数とした。これは2.2.1で考察したように n 値と k 値が連動して決まることにより相関を示すからである。解析手法はここでも変数指定法と変数減増法を用いた。変数指定法では、(1) k 値と同様の理由で流域面積は説明変数から除外するとともに、説明変数の数は2または3とし、(2) n 値と最も相関のある k 値は必ず説明変数に含めることにした。

Table 6 に解析結果を示す。Case NTN16, 17は変数減増法による n_{TN} に関する解析結果であり、打ち切り基準がそれぞれ F 分布の5%と10%の場合である。5%の場合は説明変数として k_{TN} と排出負荷量が選択

されており、10%の場合はさらに平均比流量が取り込まれている。Case NTN1~15は変数指定法による n_{TN} に関する解析結果である。説明変数に k_{TN} と排出負荷量が含まれている Case で $R^* > 0.75$ と高い値になっている。 k_{TN} の偏回帰係数の符号はいずれも負であり、 k_{TN} が大きくなれば n_{TN} が小さくなることを示しており、相関分析の場合と一致している。 n_{TP} に関する重回帰分析では R^* の最も大きいのが変数減増法による場合 (Case NTP16) であるが、 $R^* = 0.512$ と辛うじて相関があるといえる程度である。 n_{TC} に関する重回帰分析では変数指定法による Case のうち k_{TC} と森林面積比率を説明変数として含む Case で R^* が高くなっている。 k_{TC} の偏回帰係数の符号は負であり、 k_{TN} の場合と同様である。変数減増法では変数指定法で最も R^* の高い Case が選ばれている。このように n 値に関する重回帰分析では k 値あるいは k 値と相関の強い排出負

Table 7 Adopted regression models for k and n values with applicable ranges

Dependent variable	Regression equation	(R ²)	Applicable range
k_{TN}	$= -0.004666 + 0.003218 \cdot \text{LOADN}$	(0.924)	$2.12 \leq \text{LOADN} \leq 46.3$
k_{TP}	$= -0.001238 + 0.006218 \cdot \text{LOADP}$	(0.887)	$0.217 \leq \text{LOADP} \leq 4.09$
k_{TC}	$= 0.005958 + 0.002444 \cdot \text{LOADC}$	(0.889)	$9.35 \leq \text{LOADC} \leq 328$
n_{TN}	$= 0.8829 - 28.81 \cdot k_{TN} + 0.08836 \cdot \text{LOADN}$	(0.771)	$\text{LOADN} \leq 119$
n_{TP}	$= 1.066 - 0.1947 \cdot \text{LOADP}$	(0.512)	$\text{LOADP} \leq 2.91$
n_{TC}	$= 2.151 - 1.771 \cdot k_{TC} - 0.01148 \cdot \text{FRS} - 0.01151 \cdot \text{AGR}$	(0.846)	$(\text{LOADC} \leq 200) \cdot ^{*1}$

Unit: LOADN, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; LOADP, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; LOADC, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; FRS, %; AGR, %.

*1 Decided from the results for the 108 rivers in the Lake Biwa watershed.

荷量が説明変数として含まれている場合の R^* が高いことがわかる。

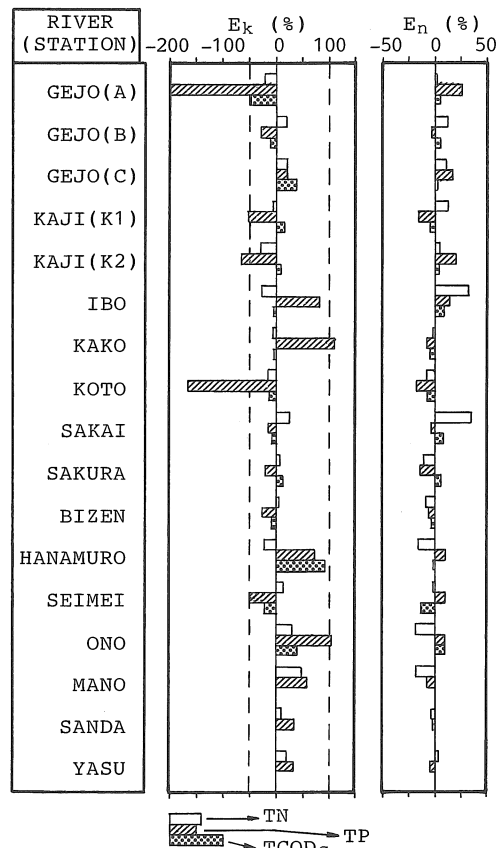
以上から、 n 値を推定する回帰モデルとしていずれを採用するか検討してみよう。 n_{TN} では Case NTN12 (=NTN17) の R^* が他の Case より少し大きい、説明変数として含まれる平均比流量の実測データは入手が困難であるので採用しないことにし、次に R^* の大きい Case NTN5 (=NTN16) を採用する。 n_{TP} では R^* の大きい Case がないので、第 1 近似として Case NTP16 を採用する。 n_{TC} では R^* の最も高い Case NTC16 を採用する。Table 7 に採用した回帰モデルをまとめて示す。

3. k , n 値に関する回帰モデルの検証

この章では、前章で採用した k , n 値を推定するための回帰モデルの検証を行うとともに、モデルの適用範囲についても検討する。検証は以下に示すように 2 通りの方法で行う。1 つは、前章で解析対象とした 14 河川 17 地点について、実測データから得られた k , n 値 (以下、実測 k , n 値とする) と回帰モデルで推定した k , n 値 (推定 k , n 値とする) を比較する方法である。もう 1 つは、詳細な実測データが利用できる下条川と鍛冶川の 5 地点について、実測 k , n 値と $L=kQ^n$ 型モデルを使って推定した負荷量 (実測 k , n 値による負荷量とする) および推定 k , n 値と $L=kQ^n$ 型モデルを使って推定した負荷量 (推定 k , n 値による負荷量とする) を比較する方法である。

3.1 実測 k , n 値と推定 k , n 値の比較

Fig. 4 は推定 k , n 値の相対誤差 E_k , E_n を示したものである。ここに、 $E_k = (k_e - k_o) / k_o$, $E_n = (n_e - n_o) / n_o$ (添字 e は推定値であることを、添字 o は実測値であることを示す) である。 k 値について見ると、推定値は実測値のほぼ 0.5~2 倍 (相対誤差では -50~100%) の範囲内に収まっているが、 k_{TP} では 2 地点でその範囲から大きくはずれている。しかも、そこでは $k_{TP} < 0$ となっているので、モデルの適用範囲について 3.3 で検討

Fig. 4 Relative error of estimated k and n values

E_k = Relative error of estimated k

E_n = Relative error of estimated n

することにする。

一方、 n 値では推定値が実測値の 0.8~1.4 倍の範囲に入っている。 k 値と比較すると、回帰モデルの R^* は小さい (Table 7) が誤差が少ないことがわかる。これは k 値に比べて n 値の変動幅が小さいため大きな推定誤差が生じないからと考えられる。

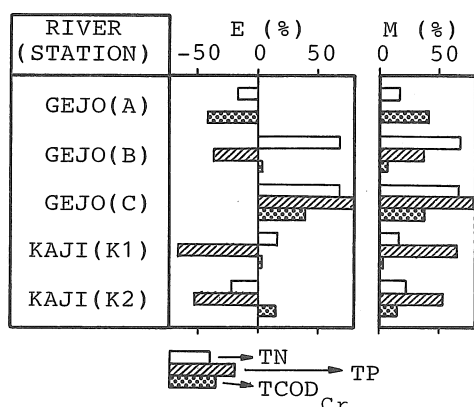


Fig. 5 Error of load calculated by the $L=kQ^n$ -type model with estimated k and n values
 E =Relative error of total load, M =Mean of daily load error

3.2 負荷量の比較

ここでは、推定 k , n 値による負荷量が、実測 k , n 値による負荷量と比較して、どの程度誤差を持っているのかを検討する。

Fig. 5 は推定 k , n 値による負荷量の誤差を示したものである。誤差の評価は1.2と同様に計算期間内の総負荷量の相対誤差 E および総負荷量に着目した平均誤差率 M で行った。相対誤差については1地点のTPを除き推定 k , n 値による負荷量は実測 k , n 値による負荷量のほぼ0.5~2 倍の範囲に入っていることがわかる。 k , n 値自身の誤差 (Fig. 4) と比較すると、下条川 B, C 地点の TN, 下条川 C 地点と鍛冶川 K1 地点の TP のように k , n 値の相対誤差 E_k , E_n の符号が等しく、しかも、 $|E_n| > 10\%$ のとき、負荷量の誤差が大きくなっているのに注意を要する。

なお、誤差の評価基準として推定値が実測値の0.5~2 倍の範囲内かどうかという基準を用いたのは、利用するデータが本モデルと類似している原単位法の場合でも推定精度がその程度である¹⁵⁾からである。

3.3 k , n 値に関する回帰モデルの適用範囲

一般に、統計モデルの適用範囲は統計解析で用いたデータの変動範囲とするのが基本である。しかし、ここでは以下に示すようにモデルで推定した k , n 値が不合理な値にならない範囲で外挿は許されるとして適用範囲を求める。

k 値に関する回帰モデルはいずれも説明変数が排出負荷量1変数であるので、モデルによる推定値が実測最小値 $\times 0.5$ ~実測最大値 $\times 2$ となる排出負荷量の範囲を求め、適用範囲とした。 n_{TN} 値に関する回帰モデルは説明変数が k_{TN} と $LOADN$ の2変数であるが、 k_{TN}

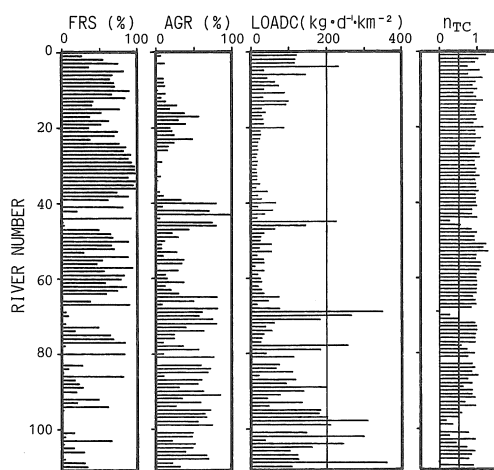


Fig. 6 Estimation of n_{TC} for the lake Biwa watershed

の回帰モデルを代入すれば説明変数は $LOADN$ 1変数となる。また、 n_{TP} 値に関する回帰モデルも説明変数は $LOADP$ 1変数である。よって、 n_{TN} , n_{TP} 値については、実測値の変動範囲を参考にして推定値が0.5~1.5となる排出負荷量の範囲を適用範囲とした。 n_{TC} 値に関する回帰モデルは説明変数が3変数であり、以上と同様の方法では適用範囲を決定することができないので、琵琶湖集水域108河川への適用結果 (Fig. 6) から判断した。すなわち、説明変数の値が重回帰分析で用いたデータの変動範囲外であっても $n_{TC} < 0.5$ と不合理な値になる ($n_{TC} > 1.3$ となる場合はない) のは FRS , AGR の値に関わらず $200 < LOADC$ の場合であるので、 $LOADC < 200$ の場合は第1近似として適用可能とした。以上のようにして求めた回帰モデルの適用範囲を Table 7 に示す。

4. 結 論

本研究では $L=kQ^n$ 型の流送能力型汚濁流出モデルに着目し、種々の流域特性等を説明変数とする、 k , n 値に関する回帰モデルを確立することを目的とした。そのため、 k , n 値と種々の流域特性との関連解析を、14河川17地点に関するデータを用いて行った。 k , n 値に関する重回帰分析により、(1) k 値に関しては排出負荷量1変数のみが説明変数である回帰モデルでも相関係数が大きいこと、(2) n 値に関しては k 値あるいは k 値と相関の強い排出負荷量が説明変数として含まれている回帰モデルで相関係数が大きいことがわかった。この結果から k , n 値を推定するための回帰モデルを Table 7 のとおりとし、14河川17地点のデータを用いて検証した。それによると、ほとんどの地点で、推定

k , n 値もそれを使って推定した負荷量も実測値の 0.5~2.0 倍の範囲に含まれた。

本研究で提示した汚濁流出モデルは、流量推定のためのタンクモデルと組み合わせることにより、次のような特徴を持つ。(1)モデルの中心になっているのは $L=kQ^n$ 型モデルである。よって、パラメータ数が少なく、実用的であり、流量の変動に対応した負荷量の変動を予測することができる。(2)モデルの適用に必要なデータは、流量をタンクモデルにより推定するための降水量データと、 k , n 値を回帰モデルで推定するための流域特性のデータである。(3)よって、 k , n 値を確定するための実測流量や負荷量のデータは不必要であり、これらのデータが利用できない河川にもモデルを適用できる。(4) k , n 値が流域特性から推定できるので、環境管理施策と対応させて負荷量を予測できる。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、浮田正夫・中西弘両氏、海老瀬潜一氏、國松孝男氏および茨城県環境局霞ヶ浦対策課の関係者の方々に多くのデータを提供いただき、使用させていただいた。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。また、下条川と鍛冶川の調査には富山県立技術短期大学（現、富山県立大学）教員、学生の多くの方々に協力していただいた。あわせて謝意を表する次第である。

(原稿受付 1990年8月29日)

(原稿受理 1991年3月28日)

引 用 文 献

- 1) 奥川光治, 宗宮功(1983)数理モデルによる富栄養化のシミュレーション解析, 土木学会論文報告集, 第337号, 119-128.
- 2) 松岡譲(1984)霞ヶ浦の富栄養化モデル, 国立公害研究所研究報告, 第54号, 53-242.
- 3) 山口高志, 吉川勝秀, 奥石洋(1980)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, 49-63.
- 4) 海老瀬潜一, 宗宮功, 平野良雄(1979)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, 21, 1422-1432.
- 5) 関根雅彦, 浮田正夫, 山本修司, 中西弘(1986)摂保川のポルトグラフシミュレーション, 衛生工学研究論文集, 22, 103-109.
- 6) 浮田正夫, 関根雅彦, 中西弘(1989)汚濁負荷流達率を利用したポルトグラフシミュレーション, 「河川汚濁のモデル解析」(國松孝男, 村岡浩爾編著), 163-171, 技報堂出版, 東京.
- 7) 河原長美, 森田一也, 五百木通隆(1986)旭川の水質および汚濁負荷量の特性に関する研究, 第14回環境問題シンポジウム講演論文集, 59-66.
- 8) 奥野忠一, 久米均, 芳賀敏郎, 吉澤正(1971)多変量解析法, 430pp., 日科技連, 東京.
- 9) 浮田正夫, 中西弘(1985)河川の汚濁負荷流達率に関する研究, 土木学会論文集, 第357号, 225-234.
- 10) 海老瀬潜一(1984)霞ヶ浦流入河川調査の水質データ, 国立公害研究所研究報告, 第50号, 119-133.
- 11) 海老瀬潜一(1988)無機イオンの流出負荷量原単位と流出特性, 衛生工学研究論文集, 24, 261-271.
- 12) 今地由美子, 西浦泰久, 北村源次郎, 國松孝男(1983)河川の物質流出特性3, 日本陸水学会第48回大会講演要旨集, 36.
- 13) 北川博之, 北村源次郎, 國松孝男(1983)河川の物質流出特性4, 日本陸水学会第48回大会講演要旨集, 37.
- 14) 國松孝男(1986)河川による物質流送, 「プロジェクト研究記録集 No. 85A2」(滋賀県琵琶湖研究所編), 107-138, 大津.
- 15) 福島武彦(1989)全国的にみた河川水質・汚濁負荷流出予測モデル, 「河川汚濁のモデル解析」(國松孝男, 村岡浩爾編著), 193-204, 技報堂出版, 東京.

- 1) 奥川光治, 宗宮功(1983)数理モデルによる富栄養化のシミュレーション解析, 土木学会論文報告集, 第337号, 119-128.

論文要旨

第三級・エーテル構造化合物を含む難分解性産業廃水の生物処理

平田 彰* 保坂 幸尚** 金原 和秀***

* 早稲田大学理工学部応用化学科 ** 同左(現東京都下水道局計画部) *** 同左(現長岡技術科学大学工学部)

〈水質汚濁研究 Vol. 14 No. 6 (1991) pp.379~384〉

第三級・エーテル構造化合物である 2-tert-ブトキシエタノール (ETB) を含む廃水の生物処理を検討した。実験装置は汚泥自返送式の小型の活性汚泥処理装置である。ETB を単一基質として生物処理すると、ETB 以外の生成物質が蓄積したが、ETB に他の類似構造化合物等を共存させると、他の生成物質の蓄積は観察されなくなった。この場合、共存物質としては、易分解性(低級・分岐度小のアルコール、2-n-ブトキシエタノール、グルコース)の方が難分解性(tert-ブタノール、2-sec-ブトキシエタノール)より、ETB 除去率が高くなった。また、滞留時間のステップ状短縮操作により、活性汚泥の ETB 処理能が向上し、ETB を工業的に生物処理することが十分に可能となった。

流域特性を考慮した流送能力型汚濁流出モデルの開発

奥川 光治* 宗宮 功** 大西 行雄***

* 富山県立大学短期大学部環境工学科 ** 京都大学工学部衛生工学科 *** 滋賀県琵琶湖研究所

〈水質汚濁研究 Vol. 14 No. 6 (1991) pp.385~393〉

本研究では、 $L=kQ^n$ 型(L :比負荷量、 Q :比流量、 k , n :定数)の流送能力型汚濁流出モデルに着目し、種々の流域特性等を説明変数とする、 k , n 値に関する回帰モデルを確立することを目的とした。

そのため、 k , n 値と種々の流域特性との関連解析を、14河川17地点に関するデータを用いて行った。 k , n 値に関する重回帰分析により、(1) k 値に関しては排出負荷量1変数のみが説明変数である回帰モデルでも相関係数が大きいこと、(2) n 値に関しては k 値あるいは k 値と相関の強い排出負荷量が説明変数として含まれている回帰モデルで相関係数が大きいことがわかった。

この結果から k , n 値を推定するための回帰モデルを決定し、実測データを用いて検証した。それによると、ほとんどの地点で、推定 k , n 値もそれを使って推定した負荷量も実測値の0.5~2.0倍の範囲に含まれた。さらに、回帰モデルの適用範囲についても検討した。