

(6) 連続調査による河川汚濁物質流下機構の検討

STUDY ON FLOW DOWN PROCESS OF NUTRIENTS IN A RIVER BASED ON A CONTINUOUS SURVEY FOR A LONG PERIOD

関根 雅彦*, 浮田 正夫*, 中西 弘*

Masahiko SEKINE, Masao UKITA, Hiroshi NAKANISHI

ABSTRACT; The final purpose of this study is to evaluate and control the inflowing amount of nutrients into closed water area. For the first step to this purpose, the process of nutrient transfer and change in a river was studied. There have been many studies that dealt with the detailed profile of the process, but few which considered the whole system in good balance. In this paper, the total system of a river was studied using computer simulation method based on continuous data for a long period which contain nutrients concentration at up and downstream observation points in one river, sediment amount within these two points, and flow rate. As the results, it became clear that the effects of sedimentation and wash out of suspended matters, adsorption of soluble phosphorus, removal of soluble nitrogen and dissolution of COD might play an important part in the process of nutrient transfer and change in a river. Those effects have been considered little before.

KEYWORDS; Flow down process, Nutrients, Water quality, River, Simulation.

1. はじめに

閉鎖性水域の富栄養化問題の深刻化に伴い、対象水域に流入する河川の汚濁負荷制御の必要性から、汚濁物質流下機構の解明が求められている。これまで、リン(P)や窒素(N)の吸着・溶出、SSの堆積・掃流、その他、河川水体内での個々の現象については実験室的に検討が加えられてきた。しかし、河川全体における汚濁物質の挙動を考える場合、個々の機構に対する調査・研究の精度のアンバランスから、それらの結果を単に組み合わせるだけで実際の河川での挙動が再現できるかという点、必ずしもそうは言えない面があった。一方、実際の河川における調査では、1)天候予測の精度の関係で降雨初期を逃さずに調査を実施することが困難である。2)晴天時降雨時を含めて、ダイナミックに変動する河川での状況に対して、調査間隔、回数が不十分となりがちである。等の理由で、対象区間への流入量、堆積量、掃流量、対象区間からの流出量等を物質収支のとれた形で把握した例は少なく、河川水体内の個々の機構に立ち入った検討を加えるにはいたらなかった。既存の汚濁物質の流下に係わる研究で、河床における堆積量をも考慮した例としては、河床付着生物群に注目した研究¹⁾や、週1回の定期採水と隔週の堆積物量観測を基礎として1年間に渡って追跡した研究²⁾があり、貴重な成果を挙げているが、流量変動に応じて刻々変化する堆積・掃流に対して調査頻度は必ずしも十分とは言えない。

著者らはかねてより汚濁物質の堆積・掃流機構に注目し、晴天時に堆積した汚濁物質が降雨時に掃流されるという現象を軸として、汚濁物質流下機構のモデル化を試みてきた³⁾。しかし、以上に述べた理由から、

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

モデルのパラメータ値の決定が困難であるだけでなく、モデルの構造自体の信頼度も小さくならざるを得なかった。

以上の観点から、本研究では、対象河川を山口県宇部市の真締川にしほり、中流域に途中流入の無い調査区間を設け、上流端と下流端に自動採水器を設置して周日観測体制を敷くことにより、汚濁物質の堆積・掃流・流出の過程を物質収支を取りつつ長期間に渡って追跡した。そして、この実測データに基づいて、河川の全体像を出発点として汚濁物質の挙動の個々の現象に対して検討を試みた。

2. 調査方法

調査対象地点を図1に示す。上流調査地点における流域面積は約7.06 Km²、流域内人口約2200人、土地利用は田127ha、畑68ha、採石場などの裸地50ha、住宅地60haで残りの流域は山林である。対象区間は川幅約6m~12m、流下距離735mのほぼ直線部分で、滞留時間は平水時で約1時間程度である。上流側約1/3部分は河床面積の40%程度をガマ、ヨシ等の水生植物が占めている。また対象区間の下流端より約100m下流には河床部に露出した形で農業用水の伏せ越しの暗渠があり、これが堰の働きをして対象区間下流部では流速が極端に遅くなる場合がある。対象区間の上流端には、水位-流量換算式フローメータとコンポジットサンプラーを設置し、一定水量通過毎に定量採水を行った。この際、

1日の間に12回以上採水するよう留意した。なお、フローメータへの入力データとして、本調査に先立って水位-流量曲線を実測により作成した。一方、下流端には2時間に1本の割合で採水するバキュームサンプラーを設置し、上流の流量記録の結果に従って流量コンポジットを行なった。調査期間中は毎日サンプルを回収すると共に堆積物調査地点で堆積量調査を行なった。堆積量測定法としては、これまでコンクリートブロックや石板を用いてその表面に付着・堆積する物質量を測定する方法が主にとられている^{1, 2)}。しかし、本研究における堆積物としては、流量変化に対して容易に堆積・掃流を起こす「易掃流堆積物」を想定しており、石板等を河床に設置することにより河床の物理的状态を変化させることは好ましくない。このため、堆積量は、内径30cmの塩化ビニール製の円筒を対象とする川底に静かに立て、ひしゃくを用いて円筒内の水を攪はんして易掃流堆積物を掃流懸濁させ、攪はん前後の水質濃度の差より単位面積あたりの堆積量を求め、これに調査区間の面積を乗ずることにより得た⁴⁾。

採取水の分析項目はSS, COD, solCOD, NH₄-N, NO_{2,3}-N, K_J-N, solK_J-N, PO₄-P, solT-P, T-P, 堆積物の分析項目はCOD, NO_{2,3}-N, K_J-N, T-Pである。分析方法はJIS K0102に準じ、著者らが一部改良した方法によった⁵⁾。なお、本調査の1日は回収時間の都合上、午前1時から翌日の午後1時までとした。

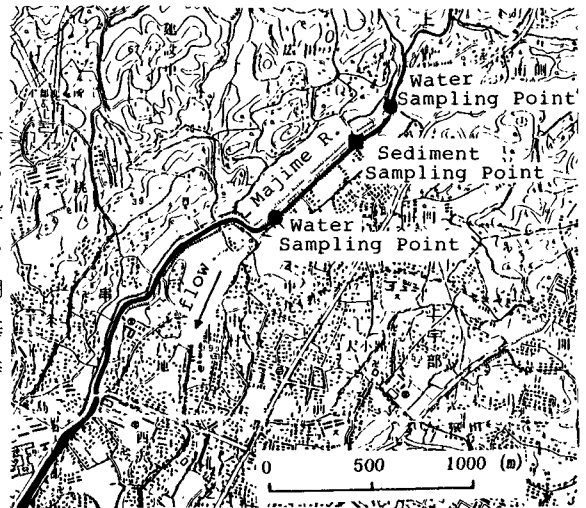


Fig.1 Sampling Points

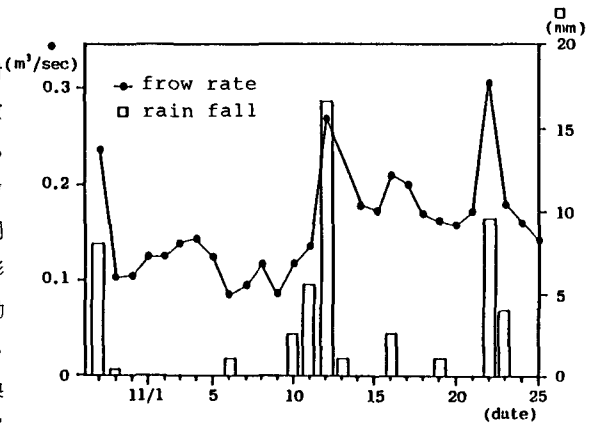


Fig.2 Daily Variations of Flow Rate and Rainfall

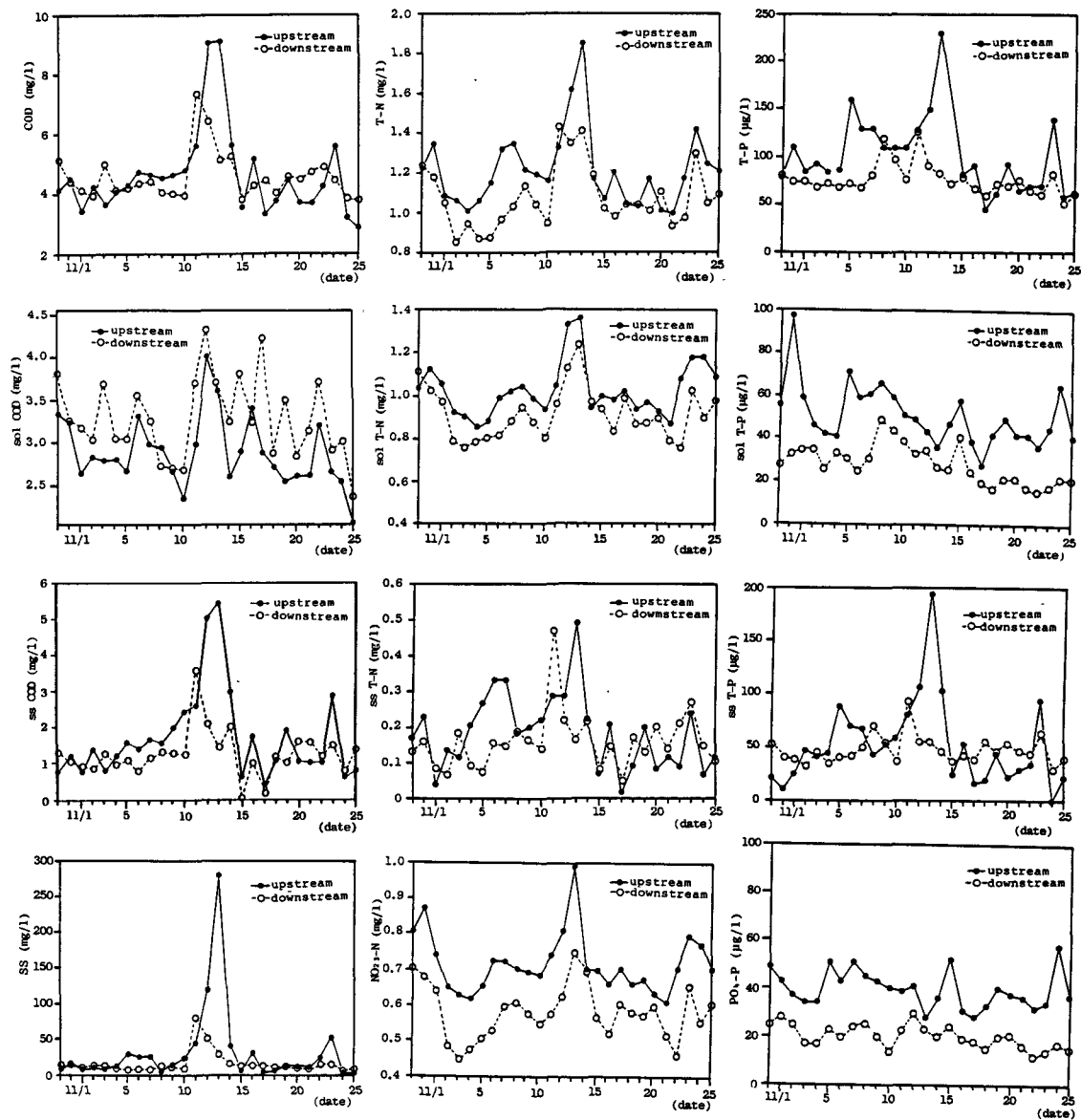


Fig.3 Daily Variations of Pollutant Concentration

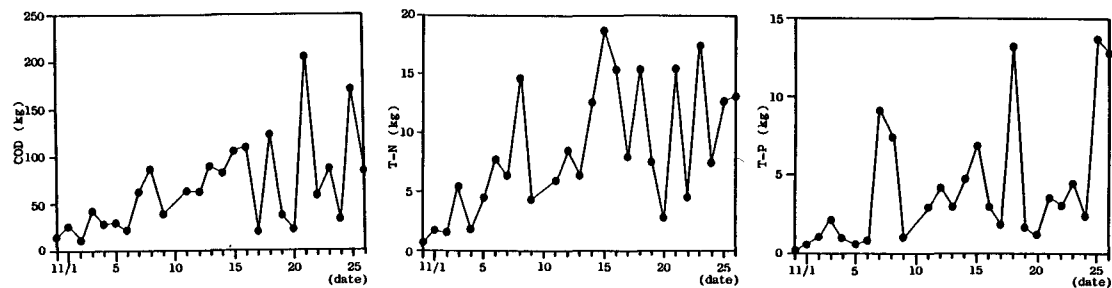


Fig.4 Daily Variations of the Amount of Sediment

3. 結果と考察

調査期間中は、10/29に8mmの降雨があったものの前半10/31～11/9はほとんど降雨のない穏やかな天候であった。後半は11/12の降雨強度16.5mm/dayを最高に、11/10～13にかけて連日雨が降り続け、その後、ぐずついた日が続き、2日ごとに数mmの雨が降った。以後、10/31～11/9を晴天期、11/10～11/25を降雨期、11/10～11/13を最強降雨時として解析を進める。なお、表中では晴天期をF.P.,降雨期をR.P.,最強降雨時をS.P.,全期間をA.P.と表す。調査区間の降雨量、流量変化、水質濃度変化、堆積量変化を図2、図3、図4に示す。

3.1 汚濁物質総量としての解析

まず、懸濁態(ss態)と溶存態(sol態)を区別しない、汚濁物質総量としての解析を行った。

全期間、晴天期、降雨期、最強降雨時それぞれの期間の水質濃度、負荷量、堆積量、流下率の最大値、最小値、平均値、標準偏差、変動係数を表1に示す。

表1より特徴をいくつか拾いだしてみると、

- 1) 水質濃度、負荷量とも下流の方が変動が小さい。特に降雨期。
- 2) ほとんど全ての項目でT-Nの変動がCOD、T-Pに対して小さい。特に降雨期。
- 3) 流下率は、COD、T-N、T-Pの順に小さな値となった。
- 4) CODの流下率は1を超える場合が多い。
- 5) 流下率は、降雨期の方がやや大きな値を示すものの、最強降雨時にはむしろ晴天期より小さい。
- 6) 濃度変動、負荷量変動は降雨期の方が大きいものに対して、堆積量変動は晴天期、降雨期ともほぼ同程度の値を示している。
- 7) 堆積量は最強降雨時の一時期を除いて降雨期の方が多い。

等が挙げられる。

4)はCODの増加によるもので、これは有機物の生産によると考えられる。これには、調査区間上流部の水生植物も関与しているものとおもわれる。

流下率に関しては、これまで著者らは $\text{流下率} = \exp(-k \times \text{流下距離})$ (k :減少係数(1/Km))として解析を加えてきた。ここでも同様の手法を用い、流下距離を0.735Kmとして減少係数を求めると

Table 1 Outline of Obtained Data

	Rain-fall (mm)	Flow Rate (m ³ /s)	Pollutant Concentration(mg/l)(ug/l for TP)						Pollutant Load (kg/day)						Amount of Sediment (kg)						Flow Down Ratio		
			Upstream			Downstream			Upstream			Downstream			Upstream			Downstream			Upstream		
			COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P	COD	T-N	T-P
A.P. Max	16.5	0.3141	9.1	1.85	230	7.4	1.43	1261	212	38	4.5	151	32	2.11	205	18.7	13.71	1.37	1.09	1.31			
Min	0.0	0.0861	2.9	0.99	45	3.8	0.85	521	35	9	0.8	30	7	0.51	11	0.6	0.21	0.57	0.74	0.36			
Ave.	1.7	0.1591	4.7	1.21	104	4.6	1.07	761	67	17	1.4	64	15	1.01	65	8.3	3.81	1.03	0.89	0.80			
S.D.	3.7	0.0541	1.5	0.20	41	0.8	0.16	171	43	8	0.9	29	6	0.41	49	5.4	3.71	0.21	0.10	0.24			
C.V.	2.24	0.341	0.32	0.16	0.39	0.18	0.15	0.221	0.65	0.45	0.61	0.46	0.41	0.381	0.75	0.65	0.981	0.20	0.11	0.29			
F.P. Max	1.0	0.1441	4.8	1.35	160	5.0	1.18	1201	51	13	1.7	61	12	1.21	86	14.6	9.11	1.37	0.96	1.09			
Min	0.0	0.0861	3.5	1.01	84	4.0	0.85	681	35	9	0.8	30	7	0.51	11	0.6	0.21	0.86	0.74	0.45			
Ave.	0.1	0.1151	4.3	1.18	110	4.3	1.00	801	42	12	1.1	43	10	0.81	38	4.9	2.41	1.01	0.85	0.75			
S.D.	0.3	0.0211	0.4	0.13	25	0.3	0.11	171	5	1	0.2	9	2	0.21	23	4.2	3.21	0.16	0.08	0.19			
C.V.	3.16	0.181	0.10	0.11	0.22	0.07	0.11	0.211	0.13	0.11	0.23	0.21	0.17	0.241	0.64	0.85	1.321	0.15	0.10	0.25			
R.P. Max	16.5	0.3141	9.1	1.85	230	7.4	1.43	1261	212	38	4.5	151	32	2.11	205	18.7	13.71	1.33	1.09	1.31			
Min	0.0	0.1191	2.9	0.99	45	3.8	0.93	521	36	12	0.8	41	10	0.71	21	2.8	1.31	0.57	0.76	0.36			
Ave.	2.7	0.1871	4.9	1.23	101	4.7	1.12	741	82	20	1.7	78	18	1.21	84	10.6	4.71	1.04	0.92	0.83			
S.D.	4.5	0.0501	1.9	0.23	48	1.0	0.17	171	49	8	1.1	30	6	0.41	53	5.0	3.81	0.24	0.10	0.26			
C.V.	1.71	0.271	0.38	0.19	0.48	0.21	0.15	0.231	0.60	0.40	0.63	0.39	0.32	0.311	0.63	0.48	0.821	0.23	0.11	0.31			
S.P. Max	16.5	0.2711	9.1	1.85	230	7.4	1.43	1261	212	38	4.5	151	32	2.11	89	8.5	4.21	1.31	1.08	0.97			
Min	1.0	0.1191	4.8	1.18	110	4.0	0.95	761	49	12	1.1	41	10	0.81	61	5.9	2.91	0.57	0.76	0.36			
Ave.	6.4	0.1891	7.2	1.49	155	5.7	1.28	941	127	25	2.7	95	21	1.51	71	6.9	3.41	0.85	0.87	0.68			
S.D.	7.0	0.0731	2.3	0.31	53	1.5	0.22	221	81	14	1.6	45	10	0.61	18	1.4	0.71	0.32	0.14	0.25			
C.V.	1.10	0.381	0.31	0.21	0.34	0.26	0.18	0.241	0.64	0.53	0.60	0.48	0.47	0.371	0.22	0.20	0.211	0.38	0.16	0.39			

Ave.:Average S.D.:Standard Deviation C.V.:Coefficient of Variation

CODで $k = -0.040$, $T-N$ で $k = 0.16$, $T-P$ で $k = 0.31$ となった。この減少係数の値自身は、流下時間や付着藻類等の効果も含むため、一般性という点では疑問があるが、逆に言えば河川の特徴を表す値とも考えられる。この値を過去の色々な河川の減少係数の値^{6,7)}と比較すると、CODでは今回の値の方が小さく、N,Pでは今回の方が大きい値となった。このことや、上記の1), 5), 6), 7)等は、調査区間下流部における流速の低下により、懸濁態負荷の多い降雨期に堆積が生じ易いことが一つの原因であろう。また、2), 3)等もそれぞれの物質毎の sol 態と ss 態の構成比の違いにより生じているとも考えられる。いずれにせよ、ss 態と sol 態を合わせた汚濁物質総量としての解析では汚濁物質の挙動を説明するには不十分であると思われる。

3.2 ss 態と sol 態を区別した解析

次に汚濁物質を ss 態と sol 態に分けて解析を行った。流下率の

経日変化を図 5 に、各期間の流下率平均値と標準偏差を表 2 に示す。これらより、sol 態の流下率は調査期間を通じて比較的安定しているのに対して ss 態の流下率は激しく変動していることがわかる。各指標の ss 態と sol 態の構成割合は調査期間中を平均すると COD で 1 : 2、T-N で 1 : 5、T-P で 3 : 2 であり、T-N は sol 態が大部分を占めている。これは、総量としての解析において、T-N の変動が COD や T-P と比較して小さかったことに対する説明となろう。また、総量としての解析では最強降雨時の流下率は晴天期より小さい値であったが、表 2 より、その原因は ss 態物質の流下率が最強降雨時に小さくなる点に求められる。

以上より、汚濁物質の流下機構として、sol 態は比較的一定の割合で減少しながら流下するが、ss 態は流れの物理的な作用で大きく変動しながら流下していく、という姿が想像される。

3.3 物質収支解析

次に、物質収支の面から検討を加えてみる。表 3 は、各期間中の流入負荷総量と流出負荷総量の差を予測堆積変動量とし、実測による堆積量変動と比較したものである。これによると COD では晴天期には予測以上に堆積が生じているが、降雨期には予測値ほど堆積していない。一方、全期間を通じて見るとほぼ収支がとれている。T-N では晴天期、降雨期を通じて予測値の 1/4 程度しか堆積していない。T-P では晴天期、降雨期を通じて予測値と実測値はほぼ一致している。また、海老瀬らの研究²⁾においても、T-COD では負荷収

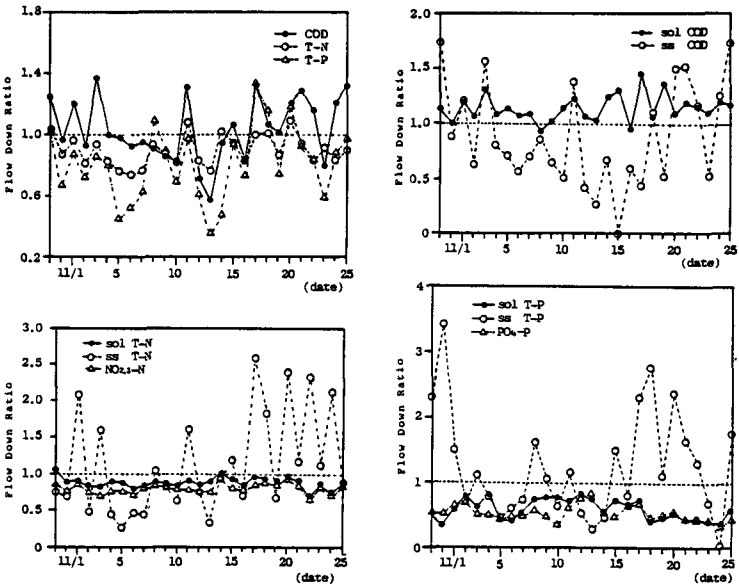


Fig.5 Daily Variations of Flow Down Ratio

Table 2 Average and Standard Deviation of Daily Flow Down Ratio

	solCOD	ssCOD	NO3-N	solT-N	ssT-N	PO4-P	solT-P	ssT-P
A.P. Average	1.14	0.88	0.81	0.89	1.15	0.52	0.58	1.24
S.D.	0.12	0.42	0.07	0.07	0.71	0.12	0.16	0.79
F.P. Average	1.09	0.85	0.79	0.88	0.84	0.52	0.60	1.19
S.D.	0.11	0.31	0.06	0.04	0.59	0.08	0.17	0.87
R.P. Average	1.17	0.91	0.82	0.89	1.34	0.51	0.57	1.27
S.D.	0.13	0.49	0.08	0.08	0.72	0.14	0.15	0.76
S.P. Average	1.12	0.64	0.78	0.89	0.84	0.62	0.76	0.65
S.D.	0.09	0.50	0.02	0.04	0.55	0.21	0.05	0.36

支から求めた予測堆積量と実測堆積量はそれぞれ 4.6～9.6, 4～19 (g/m²/day), T-Nでは予測が1.1～2, 実測が0.05～0.47 (g/m²/day)と, 表

3と同様の傾向を示している。このことより, 各項目の濃度変化の原因として, T-Nでは系外損失, T-Pでは堆積が考えられる。CODは, 分解・生産の存在により挙動が複雑であることをうかがわせる。表3の予測値に占める sol 態, ss 態の内訳を表4に示す。これによれば CODでは ss 態は流入量に較べて流出量が少ないが,

一方で sol 態は流出量の方が大きくなっており, 調査区間内で水生植物や底泥などのバッファを介した ss 態から sol 態への転換が起きていると考えられる。Nでは減少量の大部分を sol 態が占めており, 脱窒等の作用で sol 態が系外損失していると考えられる。一方 Pでは, 堆積物に移行する物質の約 2/3 が, sol 態であり, SS による sol 態 P の吸着等が大きな役割を果たしていると考えられる。なお, これまでの経験では, 間隙水も含めた堆積物中の sol 態物質は絶対量としては極めて少量であった。従って現在のところ堆積物からの sol 態物質の溶出は, 流量変動の激しい河川においては ss 態物質の掃流量に較べて無視しうると考えている。この点についてはさらに今後の検討が必要であろう。

以上より汚濁物質の変化過程の主要な経路を抽出すると図6のようになる。実際の変化過程は, 例えば CODの場合バクテリアや水生植物・藻類等による分解・供給をはじめとした種々の経路が考えられ, N, Pについても同様の事が言えるが, 図6はそれらの過程の細部には立ち入らず, 汚濁物質の ss, sol, 堆積各存在形態間の変化過程のうち, 大きなウェイトを占めると考えられる部分をこれまでの解析結果から表現したものである。また, 各期間別の流下率と減少係数を表5に示す。この減少係数の値を, 例えば sol T-Pであれば「ss 態移行係数」あるいは「吸着係数」と読みかえることも可能であろう。ただし, 今回の調査では雨量も少なく, 降雨期, 最強降雨時という呼び方も晴天期に比較した相対的なものであり, 晴天期の流量自体も変動するものであることを考え合わせると, 減少係数の値も絶対的な意味を持つものではないことに注意しなければならない。

Table 3 Observed and Predicted Variations of the Amount of Sediment

Variations of the Amount of Sediment (kg)						
	COD		T-N		T-P	
	Obs.	Pre.	Obs.	Pre.	Obs.	Pre.
A.P.	69	70	12	51	13	11
F.P.	36	-3	5	18	2	3
R.P.	32	73	8	34	11	8
S.P.	31	126	7	16	3	5

Table 4 Details of the Predicted Variations of the Amount of Sediment (kg)

	sol COD	ss COD	N03-N	sol T-N	ss T-N	P04-P	sol T-P	ss T-P
A.P.	-146	216	51.3	44.3	6.9	6.7	7.4	3.3
F.P.	-28	24	14.6	11.0	6.5	2.0	2.5	.4
R.P.	-119	192	36.7	33.3	.4	4.7	4.9	2.8
S.P.	-20	147	12.4	9.4	6.7	.8	.7	4.0

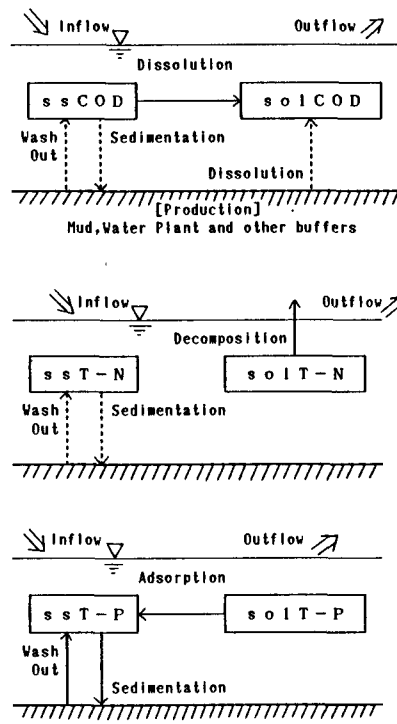


Fig.6 Presumed Behavior of Pollutants

Table 5 Total Flow Down Ratio and Decreasing Rate Coefficient for Each Period

Flow Down Distance(km)= 0.735									
	sol COD	ss COD	N03-N	sol T-N	ss T-N	P04-P	sol T-P	ss T-P	
A.P. F.D.Ratio	1.14	0.68	0.80	0.88	0.90	0.52	0.57	0.84	
D.R.Coef.	-.17	0.53	0.30	0.17	0.15	0.90	0.76	0.24	
F.P. F.D.Ratio	1.10	0.81	0.79	0.89	0.67	0.53	0.58	0.91	
D.R.Coef.	-.12	0.28	0.32	0.16	0.55	0.87	0.75	0.13	
R.P. F.D.Ratio	1.15	0.64	0.81	0.88	0.99	0.51	0.57	0.82	
D.R.Coef.	-.19	0.60	0.29	0.17	0.01	0.91	0.77	0.28	
S.P. F.D.Ratio	1.09	0.47	0.77	0.88	0.70	0.66	0.76	0.49	
D.R.Coef.	-.12	1.02	0.35	0.17	0.49	0.57	0.37	0.97	

F.D.Ratio:Flow Down Ratio D.R.Coef.:Decreasing Rate Coefficient

3.4 汚濁物質流下機構のモデル化とシミュレーション解析

以上で定性的に把握した物質変化過程をより定量的に評価することを目的として、河川における汚濁物質流下機構のモデルを作成した。ここでの目的は実測によく合致するモデルを提示する事よりもむしろ、モデルの計算値を実測値に合致させることにより得られる最適係数値から物質移動量を得ることである。すなわちシミュレーションというよりも汚濁物質流下機構を加味した多変量を扱う統計的手法に近い解析法と考えることもでき、本研究のような密度の高い実測データを用いることではじめて可能となる方法といえよう。

モデルの概念を図7に、また、用いた基礎式を表6に示す。現実には図7のモデルの概念のうち、堆積物の掃流機構ひとつをとっても現象を簡単に表現することは困難である。本研究ではこれまでに著者らが作成したモデル³⁾の経緯から、掃流力は流量の2乗に比例するという立場をとり、無次元化流量として Q/Q_0 (Q_0 は最低流量)を

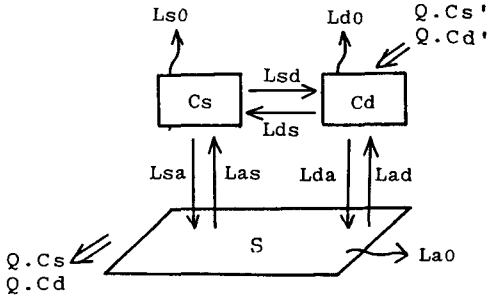


Fig.7 Outline of Model

Table 6 Basic Formula of Model

$$V \cdot \frac{dCs}{dt} = Q \cdot Cs' - Q \cdot Cs + Lsa - Lsa + Lds - Lsd - Ls0 \quad \dots(1)$$

$$V \cdot \frac{dCd}{dt} = Q \cdot Cd' - Q \cdot Cd + Lsd - Lds + Lad - Lda - Ld0 \quad \dots(2)$$

$$\frac{dS}{dt} = Lsa - Las + Lda - Lad - La0 \quad \dots(3)$$

$$Lsd = ksd \cdot Cs' \cdot V \quad \dots(4)$$

$$Lds = kds \cdot Cd' \cdot V \quad \dots(5)$$

$$Lsa = ksa \cdot Cs' \cdot V \quad \dots(6)$$

$$Las = kas \cdot (Q/Q_0)^2 \quad \dots(7)$$

$$Lda = kda \cdot Cd' \cdot V \quad \dots(8)$$

$$Lad = kad \cdot S \quad \dots(9)$$

$$Ls0 = ks0 \cdot Cs' \cdot V \quad \dots(10)$$

$$Ld0 = kd0 \cdot Cd' \cdot V \quad \dots(11)$$

$$La0 = ka0 \cdot S \quad \dots(12)$$

If $Ci + dCi/dt < 0$ ($S + dS/dt < 0$) then set $Ci=0$ ($S=0$)
and decrease $Lij, Lik, Li0$ until they satisfy the condition;
($Lij + Lik + Li0$) $\cdot dt = \text{past } Ci \cdot V$ ($Lsd + Lsa + Ls0$) $\cdot dt = \text{past } S$)
keeping the ratio $Lij:Lik:Li0$.

Q : Flow Rate [m^3/day] Q_0 : Minimum Flow Rate [m^3/day]
C' : Inflow Concentration [g/m^3] C : Outflow Concentration [g/m^3]
L : Load [g/day] t : Time [day]
S : Amount of Sediment [g] V : Volume of Water [m^3]
k : Coefficient [$1/\text{day}$] (kas [g/day])

<Subscript>

s: Suspended Matter d: Dissolved Matter a: Sediment

$ij(i, j=s, d, a)$ means $i \rightarrow j$ change.

$j=0$ means decomposition of i .

Table 7 Formula to Estimate Conformity

$$E = Es + Ed + Ea \quad \dots(13)$$

$$Es = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{Cs - Cs'}{Cs} \right)^2 \quad \dots(14)$$

$$Ed = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{Cd - Cd'}{Cd} \right)^2 \quad \dots(15)$$

$$Ea = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{Sa - Sa'}{Sa} \right)^2 \quad \dots(16)$$

Cs, Cd, Sa : Observed Value
 Cs', Cd', Sa' : Calculated Value
 $\bar{Cs}, \bar{Cd}, \bar{Sa}$: Average of
 n : Data Number Observed Value

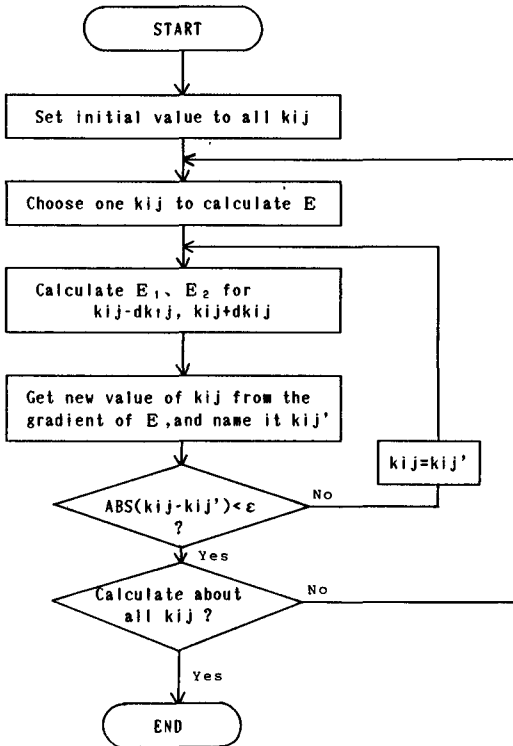


Fig.8 Flow Chart
to Get Optimized Coefficients

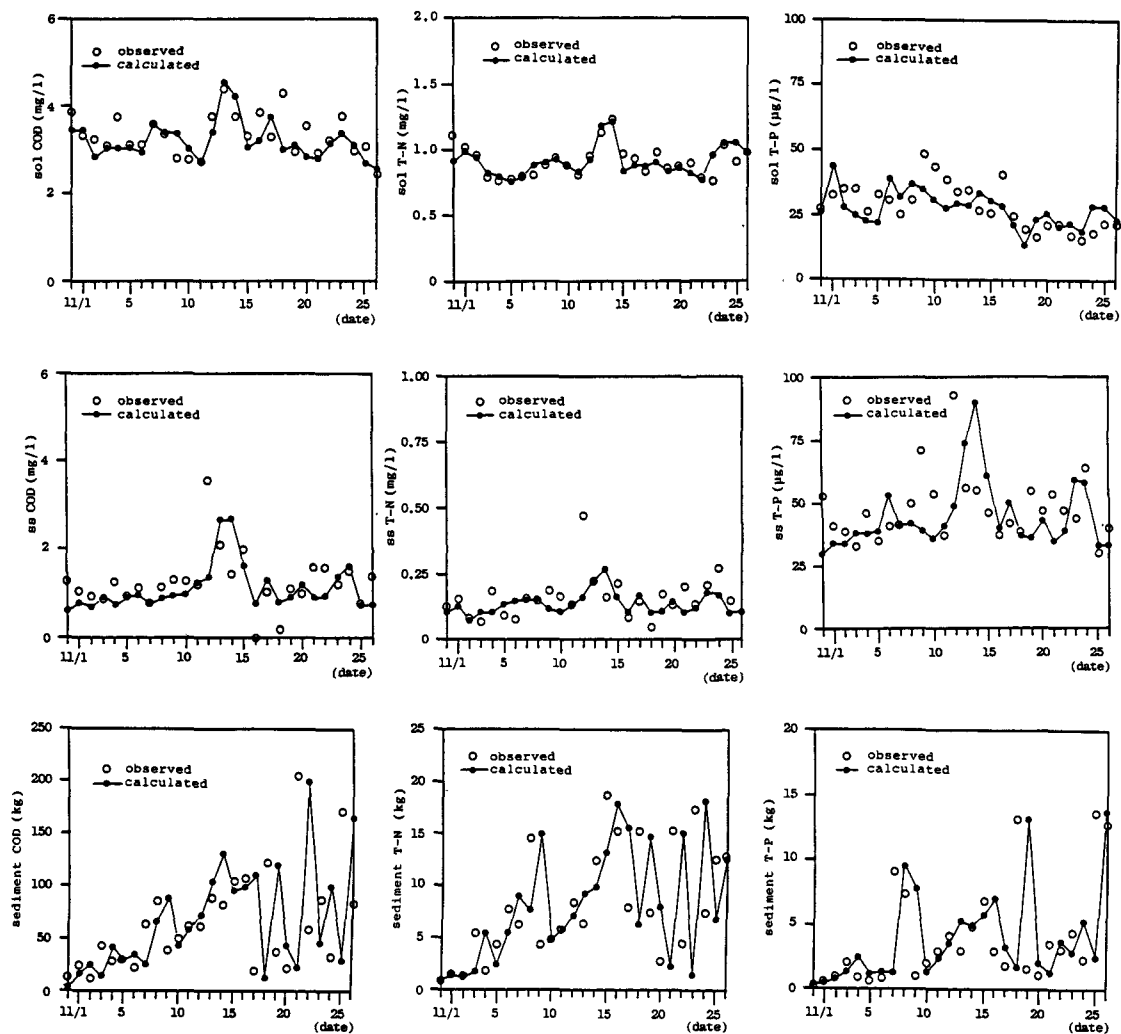


Fig.9 Observed and Calculated Values

Table 8 Results of Optimization
for Principal Coefficients

	COD	N	P
ksa	.608	.631	.699
kas	2000	350	87
ksd	.066	.000(fix)	.000(fix)
kds	.000(fix)	.000(fix)	.464
kda	.000(fix)	.000(fix)	.000(fix)
kad	.029	.000(fix)	.000(fix)
ks0	.000(fix)	.000(fix)	.000(fix)
kd0	.000(fix)	.108	.000(fix)
ka0	.000(fix)	.000(fix)	.000(fix)
Es	.236	.224	.134
Ed	.016	.007	.093
Ea	1.145	.661	1.363
E	1.397	.892	1.590

Table 9 Results of Optimization
for All Coefficients

	COD	N	P
ksa	.031	.434	.706
kas	130	231	89
ksd	.420	.320	.088
kds	.283	.189	.567
kda	.000	.000	.000
kad	.063	.026	.004
ks0	.348	.330	.000
kd0	-.031	.000	.000
ka0	.500	.000	.000
Es	.208	.210	.124
Ed	.048	.008	.079
Ea	.992	.609	1.356
E	1.248	.826	1.559

用いた。都市域における汚濁負荷流出モデルとしては、 $Q_s = k \cdot S^m \cdot Q^n$ あるいは $Q_s = k \cdot S^m \cdot Q^{n-1} \cdot (Q - Q_c)$ (Q_s : 雨天時流出流量 Q_c : 限界流量 S : 残存負荷量 n は多くの場合 2) の形の式が報告されている。³⁾ ここで、 S は本モデルにおける S と同義であるが、堆積物の掃流は河川では流速と堆積物の表面状態によって決定されるべきものであると考え、本モデルでは S は総掃流量の制限因子として用いるにとどめた。また、 sol 態の ss 態への移行や、同じく sol 態の堆積物への移行も、実際には吸着物質、被吸着物質双方の物質量が関係しているはずであるが、本モデルでは、掃流量以外はすべて注目する物質量の一次反応と考えた。

以上の基礎式を用い、 dt を 1 日として調査による上流点水質濃度、流量および堆積量から、下流点における水質濃度を推定するコンピュータプログラムを作成した。計算値と実測下流点濃度の合致度の判定には表 7 に示す評価式 E を用いた。これより、最適係数を求める問題は、ある係数 k_{ij} について E の最小値をとる k_{ij} を求める問題に帰着する。このため、図 8 に示すフローチャートに従い、ニュートン法を用い、 $aE / aK_{ij} = 0$ なる点を求めるコンピュータプログラムを作成した。

このプログラムを用い、図 6 に示す各物質変化過程についての係数を求めると表 8 のようになった。これらの係数値における実測値と計算値の関係を図 9 に示す。 sol 態濃度、 ss 態濃度、堆積量とも、おおむねよく合致させることができた。また、参考のため、全係数を自動探索させた結果が表 9 である。表 8 と表 9 を比較すると、 P ではほぼ同様の結果が得られているが、 COD , N では表 9 において、図 6 での予想と若干異なる結果を得た。これより、 P はほぼ図 6 で予想した通りの流下機構であるものの、 COD , N はさらに複雑な流下機構を持つ可能性を示唆していると考えられる。

表 8 の係数を用いたシミュレーションより求めた一日当りの物質移動量を表 10 に示す。海老瀬ら²⁾ の研究によれば、先にあげた通り山王川における堆積速度は $T-COD$, $T-N$ でそれぞれ $4 \sim 19$, $0.05 \sim 0.47$ ($g/m^2/day$) であり、表 10 における沈降と巻き上げの差とオーダー的にほぼ一致しており、物質移動量に関しては本計算結果はほぼ妥当であると考えられる。湖沼における底泥からの栄養塩の溶出速度は、 P では $0.35 \sim 80 mg/m^2/day$ 、窒素では $30 \sim 200 mg/m^2/day$ 程度の値を示す報告が多い (例えば文献 9, 10, 11))。これと比較して本河川における堆積・掃流による物質移動は数倍から数十倍大きく、かつ変動が激しい。このことから、河川においては堆積・掃流の評価が重要であることが理解される。また、これまで河川における脱窒現象や sol 態 P の底泥への移行を定量的に報告した例は少ないが、河川においてはこれらの現象が

Table 10 Calculated Behavior of Pollutants

COD	Sedimentation (A) g/m ² /day	Wash Out (B) g/m ² /day	(A)-(B) for each day g/m ² /day	Dissolution from SS g/m ³ /day	Dissolution from Sediment g/m ² /day
Min	0.770	0.381	-1.842	0.027	0.016
Max	13.558	5.078	9.775	0.358	1.131
Ave.	3.051	1.472	1.579	0.115	0.336
N	Sedimentation (A) g/m ² /day	Wash Out (B) g/m ² /day	(A)-(B) for each day g/m ² /day	Decomposition of Dissolved Matter g/m ³ /day	
Min	0.042	0.067	-.595	0.092	
Max	1.155	0.889	0.691	0.147	
Ave.	0.319	0.258	0.062	0.111	
P	Sedimentation (A) g/m ² /day	Wash Out (B) g/m ² /day	(A)-(B) for each day g/m ² /day	Adsorption of Dissolve Matter g/m ³ /day	
Min	0.000	0.017	-.098	0.013	
Max	0.507	0.221	0.391	0.045	
Ave.	0.109	0.064	0.045	0.023	

溶出におとらず重要な位置を占めている可能性が示唆された。

4 おわりに

物質収支のとれる河川の連続調査により、懸濁態物質と溶存態物質を区別して把握する必要性を指摘し、COD、N、Pの主要な変化の過程を明らかにした。また、汚濁物質流下機構のモデルシミュレーションにより、実測データから汚濁物質流下機構の個々の挙動を定量的に把握しうる可能性を示した。本シミュレーションにより、河川における水質解析には、堆積・掃流現象の把握が重要であること。脱窒や溶存態リンの底泥への吸着が重要な位置を占める可能性があることが示された。CODやNは、現モデルでは十分に挙動を再現しているとは言えないが、Pについては、およその機構を表現しえていと考えられる。本研究は、個々の現象から全体像を構成するというアプローチとは逆に、全体像から個々の現象を明らかにする、というアプローチで解析を試み、ある程度の成果を得たところに特長がある。

今後、個々の機構に対する研究の成果をモデルに組み込むことにより、汎用性のある流下機構のモデル化とパラメータの決定を行うと共に、シミュレーションを応用して重要な要素を選別することにより、目的とする精度と機構の複雑さのバランスのとれたモデル作成を試みていきたい。

最後に、本研究の調査・解析に協力頂いた山本修司氏（現 日立製作所）、安藤直樹氏（現 松尾橋梁）、分析に尽力頂いた山本俊美、二橋敏子両嬢ならびに衛生工学研究室の各氏に心から感謝申し上げます。なお、本研究は文部省科研費（奨励研究A60750532）の補助を受けました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 海老瀬潜一他：市街地河川流達負荷量変化と河床付着性生物群(1)(2)，用水と廃水，Vol. 20, No. 12, 1447-1459, 1978/Vol. 21, No. 12, 183-191, 1979
- 2) 海老瀬潜一他：河川流出負荷量としての河床沈澱・堆積量の評価，水質汚濁研究，Vol. 6, No. 2, 93-103, 1983
- 3) 関根雅彦 他：揖保川のボルトグラフシミュレーション，衛生学会研究論文集，Vol. 22, 103-110, 1986
- 4) 山本修司 他：河川水質解析における河床堆積物の評価－易掃流堆積物について－，土木学会40回年次学術講演会講演集第2部，511-512, 1985
- 5) 浮田正夫 他：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), 18-36, 1979
- 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，357, 225-234, 1985
- 7) 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回土木学会中国四国支部学術講演会概要集，79-80, 1985
- 8) 中村栄一：合流式下水道対策の検討(Ⅱ) 汚濁負荷流出シミュレーション，衛生工学研究論文集，Vol. 16, 154-159, 1980
- 9) 細見正明 他：底泥からの窒素の溶出について，衛生工学研究論文集，Vol. 19, 100-108, 1983
- 10) 寺田晴雄 他：湖沼における底泥のりん溶出 全国水道研究発表会講演集，35th, 531-533, 1984
- 11) 後藤光亀：水域の水質汚濁に及ぼす浮遊物質及び底泥の影響に関する研究，昭和59, 60年度科研総合研究(A) 59350036 研究成果報告書 p. 32, 1986