

(34) 農村域小河川における汚濁負荷量の流出解析

富山県立技術短期大学 正会員 ○奥 川 光 治

“ 能 登 勇 二

“ 安 田 正 志

1. はじめに

湖沼・内湾などの閉鎖性水域や沿岸域の富栄養化・赤潮の発生等の防止のため流域の物質循環を解明することが焦眉の課題となっており、とくに河川を通じての有機物や栄養塩の負荷が重要視されてきている。ところが、これらの物質の、河川を通じての負荷量は従来、工業、農業など産業活動から発生する量や生活排水に由来する発生量等を統計資料から算出し流出率を乗じて求めること（原単位法）が多い。したがって、それは実測されたものではなく、流域の物質循環における河川の役割を正しく評価するには不十分である。とりわけ、数学モデルにより閉鎖性水域などの水質解析、水質予測をダイナミックに行い、水質の季節変動、水質分布等を評価する場合、十分な精度をもち得ないといえる。また、農耕地、山林からの汚濁負荷量が工業、生活排水など市街地からの汚濁負荷量とともに水域の富栄養化に大きな寄与を示していることから、農村域の河川における汚濁物質の流出についての解明が必要と考えられる。本研究は一定流域の物質循環を解明することを目的とするが、その一環として今回は農村域小河川の調査結果をもとに、河川における汚濁物質の流出のモデル化を試みたので、ここに報告する。

2 モデルの概要

近年、富栄養化機構の解明、防止対策の確立等を目的として、種々の数学モデルにより湖沼・内湾等の水域の水質解析、水質予測が行われている。これらのモデルには、(1)平均的な水質を評価する統計的、静的な手法によるモデルと、(2)拡散モデルや数理生態モデルで代表されるような水質の時間変化、分布も評価しようとする動的なモデルとがある。後者の動的なモデルにより水質解析、水質予測を行う場合、河川からの汚濁負荷量の変動を、その寄与の度合から重要であると考えられるにもかかわらず、精度よくモデルに組み込めていないのが現状である。もっとも、水域自体に適用されるモデルも、自然の大規模で複雑な系を対象としているのであり精度がよいとは言えない。例えば、流動特性1つをとってみても、地形や風向、風速など多くの因子が影響しており満足のいく表現ができていないとは言えない。したがって、河川からの汚濁負荷量を与えるモデルの精度も水域自体のモデルの精度に見合った程度でよいと考えられる。また、実際に水域の水質解析、水質予測を行う場合入力データが得られるかどうかということも重要であり、入手しやすいデータのみを使用したモデルが必要となると考えられる。

本研究では以上のような観点から、河川における汚濁物質の流出の変動を、入手しやすいデータを入力として一定の精度で表現でき、しかも、パラメータの数の少ない、簡単なモデルを開発した。その概念を図-1に示す。一般に、河川における汚濁負荷量は河川の流量、したがって降水量や降雨強度、先行無降雨日数、流域の地質や土地利用状態等で決まると考えられる。ここでは、汚濁負荷量 L は流量 Q の関数とし、 $L=k \cdot Q^n$ (k, n : 係数) で表わされると考える。

また、流量は降水量、降雪深、積雪深、気温を入力データとしてタンクモデルで得ることとする。結局、汚濁負荷量を降水量、降雪深、積雪深、気温という気象データで推定することになる。

3. 調査概要

調査対象の河川は富山県内農村域の小河川である下条川である。調査は予備調査を含めて 1980年6月18日から実施しており、1981年7月末までは隔日に、それ以後は6日に1度の割合で行っており、現在も継続中である。調査地点は 1980年9月2日までは3地点、それ以後は2地点（A，C）である。採水時刻は午前11時から12時までを原則としており、上流から順番に採水している。調査項目は表-1に示

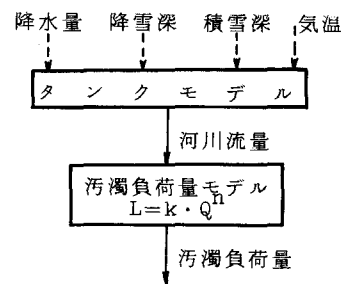


図-1 モデルの概念

す通りであり、有機物と栄養塩に重点を置いている。得られた生データは表-2の計算式により処理している。下条川流域の概況を図-2および表-3に示す。流域の最大高度は179.7m、平均河川勾配は1/5000である。土地利用の観点から流域を見ると、A地点より上流の流域Iは山林が66.8%を占め、農耕地がそれに次いでおり、集落が散在している。ため池も多く見られる。A、B両地点間の流域IIは農耕地が39.4%を占めているが、富山、高岡両市ならびに富山新港を中心とする工業地区のベッドタウンとして、新産業都市計画以来人口1万人弱のニュータウンが丘陵地に造成されほぼ完成している。団地の下水は活性汚泥法で処理されB地点のすぐ上流で下条川に放流されている。B、C両地点間の流域IIIも農耕地が46.8%を占めているが、小杉町の旧市街が位置しており、中小工場が数多く存在している。一部に都市下水路が敷設されているが処理はなされていない。なお、下条川から農業用水は取水されておらず、排水を受けるのみである。また、この流域の上水道は庄川を取水源とする広域水道の供給を受けている。下条川流域にとどまらず富山県は日本でも有数の積雪地帯であり、今回の調査期間でも18年ぶりの豪雪に見舞われている。

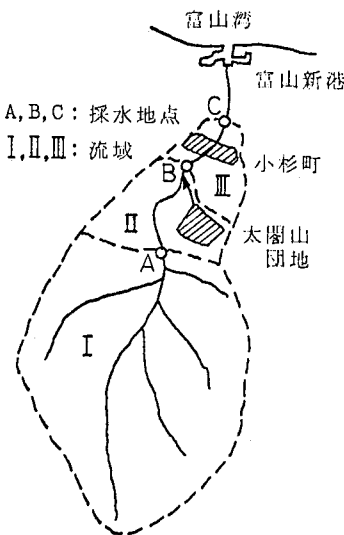


図-2 下条川流域図

表-1 調査項目

項目	方法
流量	流達計または浮子により流速を測定
水温 DO 電気伝導率	メータ
pH	比色pH計
SS	上 (メンブランフィルター法)
Chl.a	アセトン抽出
T-COD S-COD	下 (重クロム酸カリウムによる方法)
T-Kje.N S-Kje.N NH ₄ ⁺ -N	下 (ケルダール法、フェノール次亜塩素酸法)
NO ₂ ⁻ -N	上 (GR法)
NO ₃ ⁻ -N	上 (フェノールジスルホン酸法)
T-P, S-P	上

上：上水試験方法，下：下水試験方法

4. 流出解析

下条川の流量を降水量等の気象データから推定するため、図-3に示す4段のタンクモデルを設定した。降雨として最上段タンクに供給された水は始めは β_1 の孔から下段のタンクに供給されるだけであるが、最上段タンクの水位が上昇して H_1 になれば α_1 の孔

から流出するようになる。さらに水位が上昇して H_2 になれば α_2 からも流出するようになる。以下のタンクでも同様に考え、流出量 y_1, y_2, y_3, y_4 が求まるが、以上の総和を河川流量とする。ここで4段目からの流出量

表-2 データ計算法

$$\begin{aligned} P\text{-COD} &= T\text{-COD} - S\text{-COD} \\ T\text{-N} &= T\text{-Org.N} + \text{Inorg.N} \\ S\text{-N} &= S\text{-Org.N} + \text{Inorg.N} \\ P\text{-N} &= T\text{-N} - S\text{-N} (= P\text{-Org.N}) \\ T\text{-Org.N} &= T\text{-Kje.N} - \text{NH}_4^+\text{-N} \\ S\text{-Org.N} &= S\text{-Kje.N} - \text{NH}_4^+\text{-N} \\ \text{Inorg.N} &= \text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_2^-\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N} \\ P\text{-P} &= T\text{-P} - S\text{-P} \end{aligned}$$

T-: 全試料 S-: 溶解性区分
P-: 浮遊性区分 Org.: 有機態区分
Inorg.: 無機態区分

表-3 下条川流域概況 () 内は流域面積に占める% 面積単位 km²

流域	流域面積	山林	田	畑	市街地	工業地	その他	人口	牛	鶏
I	26.6	17.77 (66.8)	4.16 (15.6)	0.60 (2.3)	0.60 (2.3)	0.0075 (0.0)	3.46 (13.0)	2019	61	5010
II	5.0	0.37 (7.4)	1.92 (38.4)	0.05 (1.0)	0.85 (17.0)	0.005 (0.1)	1.81 (36.2)	11588	20	0
III	3.7	0.02 (0.5)	1.73 (46.8)	0.00 (0.0)	0.94 (25.4)	0.15 (4.1)	0.86 (23.2)	8710	4	0
II+III	8.7	0.39 (4.5)	3.65 (42.0)	0.05 (0.6)	1.79 (20.6)	0.155 (1.8)	2.67 (30.7)	20298	24	0
I+II+III	35.3	18.16 (51.4)	7.81 (22.1)	0.65 (1.8)	2.39 (6.8)	0.1625 (0.5)	6.13 (17.4)	22317	85	5010

y_4 は、4 段目への浸透量を解析期間にわたって平均化した値とした。無降雨日には蒸発散が起これと考えたが、蒸発散量は月毎に一定とし $0 \sim 5 \text{ mm/day}$ を無降雨日に負の降水量として 1 段目のタンクに入力した。下条川流域は積雪地帯であるので融雪出水を考慮する必要があるが、その計算は以下のように考えた。冬季から春季の融雪期は降雨量 R_r と融雪量 R_s を加えたものを 1 段目のタンクに入れ出水量を求める。降雨量は降水量 r から降雪量 r_s を差し引いて求める。 $R_r = r - r_s$ (mm/day) ここで、 r_s は降雪深 S (cm/day) から、新雪の密度を 0.1 (g/cm^3) として、 $r_s = 0.1 \times S \times 10$ (mm/day) となる。ただし、 $R_r < 0$ となる場合は、その日の降水量はすべて降雪になっているものとみなし、 $R_r = 0$ とする。融雪量は融雪に関する気象因子を気温で代表させ、日平均気温 T_m を用いて $R_s = m \times T_m$ (mm/day) m : 融雪の係数 (6.0 とする) で求める。ただし、 $T_m \leq 0$ の場合 $R_s = 0$ とする。また、融雪末期には、流域内の積雪部面積が減少していくが、ここでは雪線 (積雪深 0 の点を連ねた線) が等高線に沿ってしだいに流域の高高度域に後退すると仮定する。したがって、流域の面積高度曲線を作成し、雪線後退速度を 20 m/day と仮定し、積雪部の面積 P (%) を求め、 R_s は $R_s = m \times T_m \times P / 100$ で計算する。以上のようなモデルを用いて流出解析を行うが、使用した気象資料 (降水量、降雪深、積雪深、気温) は富山地方気象台 (富山市) での実測値である。シミュレーションの期間は 1980 年 6 月 17 日から 1981 年 7 月 31 日であり、A、C 両地点それぞれについて 1 日刻みで計算を実行した。実測流量が隔日にしか得られていないことを考慮して、低水流量が実測流量に適合するようにタンクモデルのパラメータを決定した。ただし、図-4 のシミュレーション結果に見られるように、梅雨期等洪水時のシミュレーションは不十分である。今後は、(1) 下条川流域内での気象資料の実測、流量のより細かな測定によるパラメータの改善、(2) ため池の出水に及ぼす影響、農業用水の影響、他流域との水の収支等についての検討、(3) 融雪の係数、雪線後退速度、下条川への捨て雪の影響についての検討、などが必要である。

5. 流量と負荷量の関係

河川における汚濁負荷量は流域の土地利用や地質、降水量、降雨強度、先行無降雨日数、河川流量などで決まると考えられる。ここでは簡単に、従来から用いられている経験式 $L = k \cdot Q^n$ で河川の流量と負荷量の関係を表示することを試みる。次節では A、C 両地点それぞれについて 1 年以上にわたる汚濁負荷量のシミュレーションを行うので、本節では係数 k , n が同一河川でも季節により、また採水地点によりいかに変動するかということを中心に検討することにする。なお、解析には 1980 年 6 月 18 日から 1981 年 7 月 31 日の A、C 両地点のデータを用いる。表-4 は全データを用いて行った $\log Q$ と $\log L$ の回帰分析の結果から得られた各水質項目ごとの k , n の値、相関係数 r 、データ数 N を示している。また、1980 年 7~8 月、9~10 月、11~12 月、1981 年 1~2 月、3~4 月、5~6 月の 2 月ずつのデータを用いて同様の回帰分析を行った。その結果の一部を図-5 に示す。図-6 には $\log Q$ と $\log L$ の関係を示す。まず、流量と負荷量の相関についてみると、1~2 月を除いて各季節、多くの項目で 2 地点とも相関は強く $r \geq 0.7$ であり、さらに $r \geq 0.6$ とすれば 1~2 月を除いたほぼ全項目で該当する。1~2 月の相関係数は、とくに Org.N で小さいが、これは融雪の影響で流量の変動が小さくなること、下条川への直接の捨て雪による負荷のためデータがばらつくことが原因と考えられる。次に n の値についてであるが、 $n > 1$ は流量増加より負荷量増加が大きいことを示しており、 $n < 1$ はその逆を示している。COD、N、Org.N それぞれについて全試料 (T)、溶解性区分 (S)、浮遊性区分 (P)

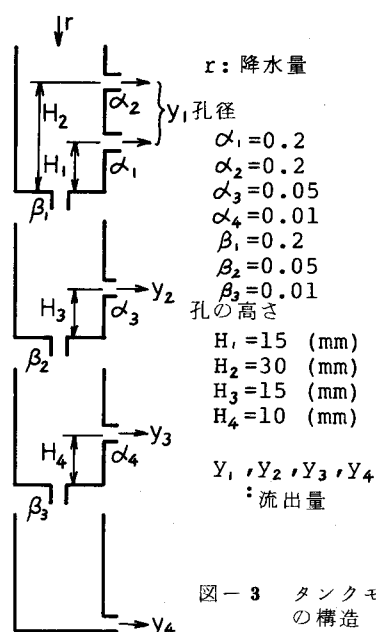


図-3 タンクモデルの構造

の n の値を比較してみると、ほとんどの場合 $P > T > S$ となっており、 $P:n=1.1\sim 1.8$ 、 $T:n=0.8\sim 1.4$ 、 $S:n=0.7\sim 1.2$ の値となっている。ちなみに、SS では $n=1.1\sim 2.1$ 、Chl.a では $n=0.9\sim 2.0$ となっている。また、 P (リン) の場合は季節により大小関係は異っており、明確な傾向は見られない。同様に、3 態の Inorg.N について n の値を比較すると、 $\text{NO}_3^- - \text{N} > \text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ となっており、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ で $n=0.9\sim 1.3$ を示している。以上から、流量増加より負荷量増加が大きいという傾向は浮遊性物質 (リンを除く) や $\text{NO}_3^- - \text{N}$ で強いということがいえる。 n の値の季節変化は SS と Chl.a の変動が類似していること、変動範囲がさほど大きくないことが特徴である。次に k の値についてであるが、COD、N、Org.N、P それぞれの T、S、P 区分間および Inorg.N の 3 態間の k の値を比較すると、 k の大小は負荷量 (濃度) の大小で決まるといえる。また、 k の値の季節変化は、SS と Chl.a の変動が類似していることは n 同様である。最後に A、C 両地点間の k の値を比較すると、SS、Chl.

a、P-
COD、P-
N という洗
殿などの自
浄作用を受
ける浮遊性
物質では
 k の値が
 $A > C$ とい
う大小関係
になっている
場合がほと
んどであ
る。都市下
水の影響が
出るだけで
なく有機物
の分解で生
成すると考
えられる
 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、そ
の酸化で生
成する
 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、
 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ や
それに規
定されてい
る T-N、
S-N、
Inorg.N、
都市下水の
影響が特に
強いと考え
られる

表-4 $L=k \cdot Q^n$ 1980.6.18-1981.7.31 ($L: \text{g/sec}, Q: \text{m}^3/\text{sec}$)

	地点	k	n	r (N)		地点	k	n	r (N)
SS	A	19.7	1.25	0.83(202)	T-N	A	0.760	0.93	0.91(194)
	C	13.8	1.58	0.88(202)		C	1.21	0.98	0.92(193)
Chl.a	A	0.0120	1.17	0.83(199)	S-N	A	0.603	0.89	0.91(192)
	C	0.00781	1.50	0.86(200)		C	1.10	0.88	0.91(192)
T-COD	A	10.4	0.93	0.92(202)	P-N	A	0.149	1.03	0.75(176)
	C	9.65	1.14	0.92(202)		C	0.121	1.33	0.80(180)
S-COD	A	6.91	0.85	0.90(202)	T-Org.N	A	0.395	0.88	0.81(195)
	C	6.66	1.01	0.88(200)		C	0.431	1.05	0.79(195)
P-COD	A	2.69	1.06	0.75(199)	S-Org.N	A	0.219	0.74	0.64(193)
	C	2.34	1.38	0.77(200)		C	0.304	0.84	0.65(193)
T-P	A	0.0523	0.81	0.85(196)	Inorg.N	A	0.341	0.96	0.94(201)
	C	0.131	0.79	0.86(194)		C	0.755	0.90	0.94(200)
S-P	A	0.0118	0.79	0.79(189)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	A	0.0917	0.79	0.81(202)
	C	0.0277	0.79	0.67(195)		C	0.331	0.72	0.75(202)
P-P	A	0.0387	0.83	0.81(192)	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	A	0.00548	0.49	0.57(198)
	C	0.0988	0.79	0.86(193)		C	0.0285	0.64	0.69(202)
					$\text{NO}_3^- - \text{N}$	A	0.229	1.04	0.94(201)
						C	0.373	1.02	0.92(200)

r : 相関係数 N : データ数

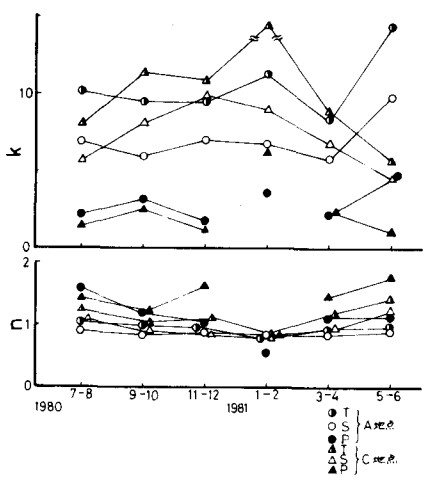


図-5 k, n 値の季節変化 (1) COD

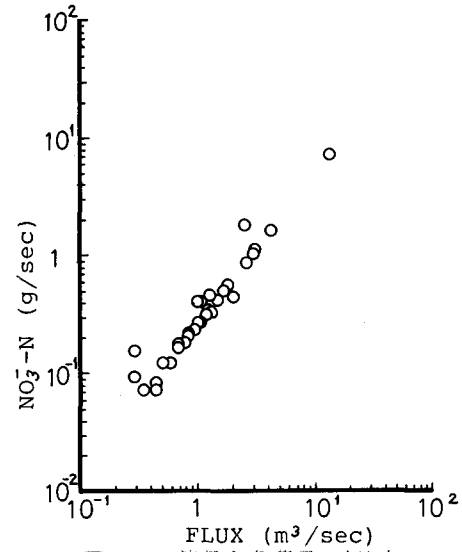


図-6 流量と負荷量 A 地点 1980.7-8

T-P、S-P、P-P では k の値が $A < C$ となっている。

6. 汚濁負荷量の流出解析

2 節で述べたように、タンクモデルで得られる流量と汚濁負荷量モデル $L=k \cdot Q^n$ とから汚濁負荷量を推定し、実測負荷量と比較検討する。シミュレーションの期間は 1980年6月17日～1981年7月31日であり、A、C 両地点、17 水質項目それぞれについて 1 日刻みで計算を実行した。シミュレーションは 2 ケースについて行った。つまり、Case 1: 2 月ずつのデータから求めた k、n 値によるシミュレーション（したがって、k、n 値は季節的に変化する）、Case 2: 全データから求めた k、n 値によるシミュレーション、の 2 ケースである。なお、Case 1 の k、n 値については、流量と負荷量の回帰分析の相関係数 r が 0.6 未満の場合、全データから求めた k、n 値で代用した。図-7 にシミュレーション結果の一部を示す。A、C 両地点とも流量のシミュレーションがうまく適合していない梅雨期等の洪水時は負荷量のシミュレーションでも不十分となっているが、各水質項目ともシミュレーション期間全体を通して低水時を中心によく適合しているといえる。また、Case 1 と Case 2 を比較すると、A 地点では Case 1 の方がよりよく適合している。C 地点でも Case 1 の適合度の方がいいが Case 2 と大差はない。さらに、両ケースの適合度を明確にするため、表-5 に各月の累積負荷量を Case 1、Case 2 それぞれについて実測値とともに示す。シミュレーションによる負荷量のオーダー、変化の様子が実測とかなり適合していること、A 地点では Case 2 より Case 1 の方が適合度がいいことはこの表からも明らかである。しかし、湖沼・内湾等の水域自体の水質解析、水質予測を行う数学モデルの精度を考えると Case 1 と Case 2 の差は大きくなく、より簡単なモデルという立場に立てば Case 2 で充分といえるであろう。

7. おわりに

本研究では、数学モデルによる湖沼・内湾等の水域の水質解析、水質予測と関連して、河川における汚濁物質の流出についてのより簡単なモデルを開発した。モデルの検証のため実測調査を実施したが、対象流域は豪雪地帯、開発を受けつつある農村域という特徴のある地域である。開発したモデルにより河川における汚濁物質の流出の変動を降水量等の気象因子からうまく推定できると考えられるが、パラメータの決定にあたっては長期流出を重視したので洪水時のシミュレーションに問題を残した。洪水時の負荷量は低水時と比較して多く、また質も違っていると考えられるので、洪水時のシミュレーションをいかに評価し、簡単なモデルに組込んでいくかは今後の重要な課題である。

最後に、モデル開発にあたり助言いただいた宗宮功氏（京都大学工学部）ならびに調査に御協力いただいた小杉町役場関係者各位に心から感謝の意を表する次第である。

表-5 累積負荷量 (A地点)

単位 ton

	T-COD			T-N			T-P		
	Obs.	Calculated		Obs.	Calculated		Obs.	Calculated	
		C.1	C.2		C.1	C.2		C.1	C.2
1980. 7	44	98	82	3.7	8.7	6.0	0.23	0.41	0.34
8	78	57	53	6.6	4.8	3.8	0.22	0.29	0.24
9	35	27	29	2.7	2.5	2.1	0.12	0.15	0.14
10	66	65	65	6.7	6.1	4.8	0.47	0.37	0.28
11	51	34	33	3.6	2.5	2.6	0.15	0.14	0.16
12	70	80	85	6.0	6.0	6.2	0.39	0.37	0.36
1981. 1	48	40	39	2.5	2.0	2.9	0.15	0.11	0.19
2	63	65	72	4.2	4.4	5.3	0.25	0.28	0.31
3	146	123	150	8.7	8.8	10.9	0.29	0.39	0.60
4	40	34	42	2.9	2.2	3.1	0.31	0.18	0.20
5	47	50	36	3.4	3.6	2.6	0.31	0.28	0.17
6	200	78	55	12.2	5.5	4.0	0.81	0.43	0.25
7	107	85	59	6.2	6.1	4.3	0.36	0.45	0.25
1980.7- 1981.7	994	836	802	69.3	63.6	58.6	4.1	3.9	3.5

Obs.:Observed, C.1:Case 1, C.2:Case 2

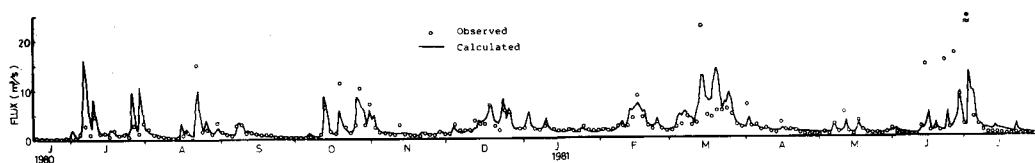


図-4 流量シミュレーション (A地点)

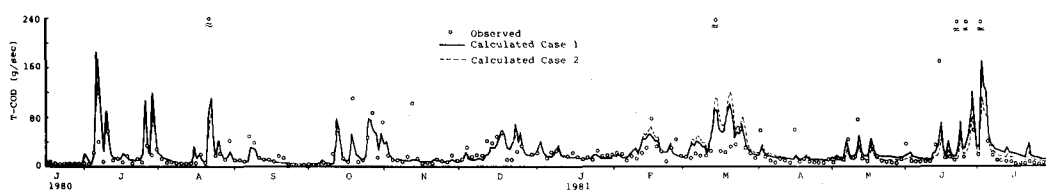


図-7 負荷量シミュレーション (1) T-COD (A地点)

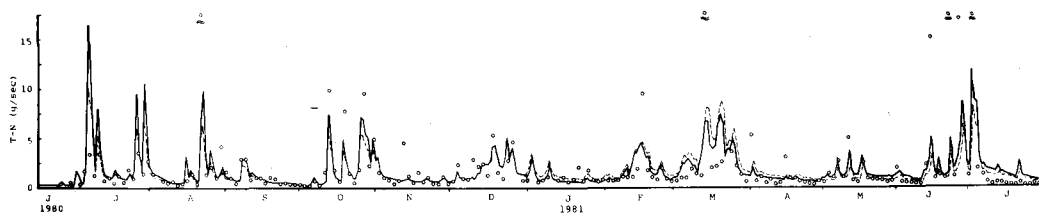


図-7 負荷量シミュレーション (2) T-N (A地点)

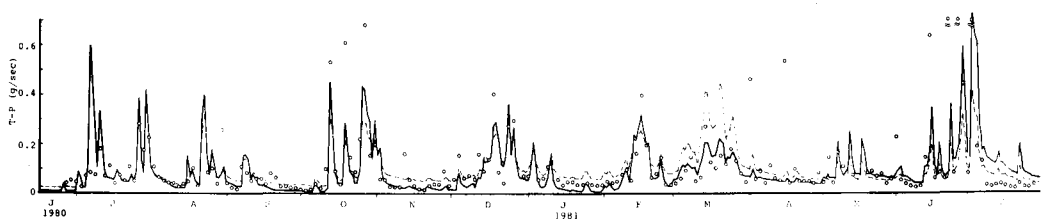


図-7 負荷量シミュレーション (3) T-P (A地点)