

## 河川の水質・負荷量に関する水文学的研究

A HYDROLOGIC APPROACH TO CHARACTERISTICS OF WATER  
QUALITY AND POLLUTANT LOAD OF THE RIVER

山口高志\*・吉川勝秀\*\*・與石洋\*\*\*

By Takayuki YAMAGUCHI, Katsuhide YOSHIKAWA

and Hiroshi KOSHIISHI

### 1. 序

霞ヶ浦や瀬戸内海などの停滞性水域の水質が悪化しており、河川の水質を改善し、主として晴天時の流入負荷量を削減するための対策として下水道の整備が急速に進められている。停滞性水域の環境保全・改善のために、流入して来る総負荷量が問題であり、そのうちの相当量が降雨時に流入しているのではないかということが認識され始めている。それとともに、従来から調査・研究が進められてきた家庭・工場・事業所などのような点源（ポイント・ソース）負荷量のみでなく、降雨等を介して流出していく非点源（ノンポイント・ソース）負荷量の問題がクローズ・アップされ始めてきている。

本研究は多河川の多水質項目について、晴天時・雨天時の汚濁負荷量の流出特性を実証的に解明するとともに、水文学的要因とその流出特性の関係を把握したものである。そして、水文学的な水質・負荷量シミュレーション・モデルの理論的な検討と、それによりどの程度まで河川の負荷量が推定できるかについて述べている。また、全般的な結論として、雨天時の負荷量制御が重要であることを指摘した。

### 2. 従来の研究と本研究の基本的立場

ここでは、河川の水質・負荷量に関する従来の研究を概観し、それらと対比することにより本研究の基本的立場と特徴を明確にしておくこととする。

#### (1) 従来の研究

河川の水質項目は、浮遊性物質と溶解性物質、あるいは有機物質と無機物質などに分類される。そして、その流出特性はそれぞれ異なっていることが多い。水文学的要因とこれらの水質項目の流出特性との関係については、古くは河川の wash load に関する Straub (1935), Campbell・Bauder (1940) に始まり、吉川 (1952)<sup>1)</sup>, Guy (1964)<sup>2)</sup>, 吉川ら (1959), 須賀 (1970)<sup>3)</sup> に至る実証的な研究があり、負荷量と流量に関して  $Q_s \propto Q^n$  ( $n$ : constant) の関係が示されている。吉川 (1952) は、さらに水文学的要因に基づく流送能力について理論的に考察し、 $Q_s \propto Q^2$  の関係を導くとともに、ハイドログラフと wash load の流出特性を比較している。河川の複数の水質項目に関する研究としては、無機物質についての Gunnerson (1967)<sup>4)</sup>、無機物質・有機物質（浮遊性物質・溶解性物質に分類している）についての羽田 (1977) の研究<sup>5)</sup>、山口・吉川 (1978) の研究<sup>6)</sup>がある。Gunnerson は  $Q_s = aQ^b$ 、羽田は  $Q_s = aQ^b + f(R)$ 、山口・吉川は  $Q_s = f(Q, R) = f(Q) + f(R) = a_i Q_i^{b_i} + a'_i R_i^{b'_i}$  (or  $a_0 + a_i Q_i + b_i R_i$ )<sup>注1)</sup> の関係について検討している。建設省淀川工事事務所 (1974)<sup>7)</sup> は、汚濁負荷量ポテンシャル  $S$  を導入した  $Q_s = f(Q, S) = f_1(Q) \cdot f_2(S) \cdot Q$  とする水文学的な水質・負荷量シミュレーション・モデルを提案している。

下水道の水質・負荷量の水文学的なシミュレーションについては、EPA の SWM モデル (1971)<sup>8)</sup>、Sartor (1972)<sup>9)</sup> による負荷量ポテンシャルを考慮した地表汚濁負荷量流出モデル、下水管内の負荷量ポテンシャルの変化に着目した稲場のモデル (1975)<sup>10)</sup>、同様の高畠らの混合モデル (mixing model) (1976)<sup>11)</sup>、山口のモデル (1976)<sup>12)</sup>などが提案されている。EPA の SWM モデル

注 1) 添字  $i$  は流量  $Q$  および降雨量  $R$  の観測地点あるいは時刻が異なることを示す。

\* 正会員 工修 建設省土木研究所都市河川研究室長  
(現在 江戸川工事事務所長)

\*\* 正会員 工修 建設省土木研究所都市河川研究室研究員  
(現在 総合治水研究室研究員)

\*\*\* 東洋大学工学部土木工学科4年生  
(現在 (株)長大橋設計センター勤務)

表一 対象河川名、水質項目、観測方法等

河川	番号	タイムスケール	水質測定方法	測定期間	観測場所	観測者	水質項目
淀川	①	日	毎日定時刻	5か年(S47~51)	*	水道局	濁度・KMnO <sub>4</sub> 消費量・NH <sub>4</sub> -N-ABS-BOD
猪名川	②	〃	〃	〃	滝山浄水場	〃	濁度・KMnO <sub>4</sub> 消費量・NH <sub>4</sub> -N-Cl <sup>-</sup>
多摩川	③	〃	〃	〃 **	調布堰玉川浄水場	〃	濁度・KMnO <sub>4</sub> 消費量・BOD-NH <sub>4</sub> -N-EC-DO
園部川	④	〃	1時間ごとの観測による流量コンボット	1年間(S47)	木川町・園部橋	〃	COD-T-P-TOC ケルダール窒素
恋瀬川	⑤	〃	〃	〃	石岡市・愛郷橋	〃	COD-T-P-TOC ケルダール窒素
山王川	⑥	〃	〃	〃	石岡市・山王橋	〃	COD-T-P-TOC ケルダール窒素

\* 磐島・庭瀬・柴島の3地点のデータを用いたが、特に地点名を明示しない場合は磐島地点に対するものである。

\*\* ただし、BODはS. 48, 49年のみである。

ル、Sartor、稻場、高畠らのモデルでは、先行晴天日(期間)に地表面あるいは下水管内に残留・堆積した負荷量の水文学的要因による流送が取り扱われている。これらのモデルの特徴は、汚濁負荷量のポテンシャルが考慮されていることであり、負荷量の“有限”供給が明確に意識されている。また、それを裏付けるための現地調査も並行して行われている<sup>6)</sup>。

以上で述べた研究のうちのいくつか(たとえばStraub(1935)と吉川(1952)の研究)は、研究をさらに発展させるとする意味で本研究と関連している。しかし、全般的にみて、それぞれの分野あるいは対象ごとに独立に進められた傾向があり、水文学的(水理学的)観点から系統的に取り扱われてはいない。本研究では、水文学的な観点から、汚濁負荷の流出現象を系統的に分析・把握することを試みている。

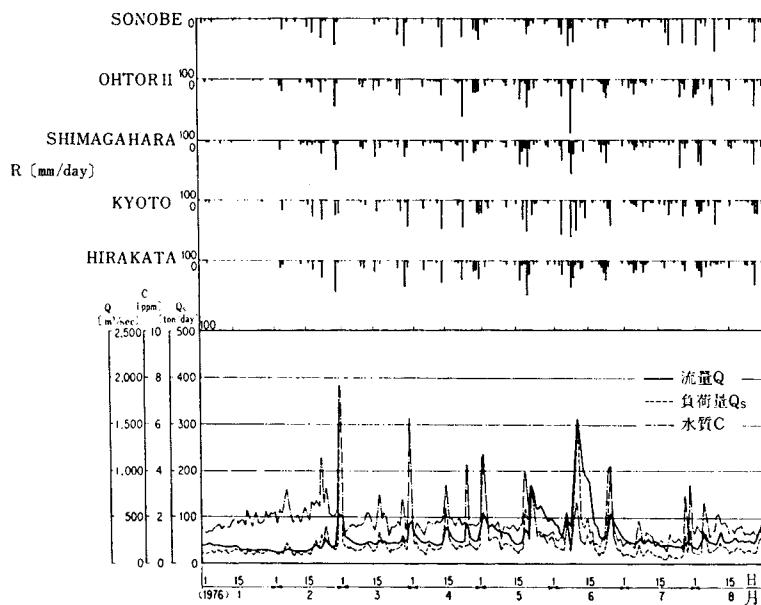
## (2) 本研究の基本的立場と特徴

本研究は、上述のような水文学的研究が必要とされているという問題意識のもとで、晴天時・雨天時を含めた複数河川・複数水質項目の水質・負荷量の特性を実証的に取り扱う。そしてその特性(ポルートグラフの特性、晴天時・雨天時流出負荷量の特性)を水文学的な要因との関連のもとで把握する。さらに水文学的要因によりどの程度その負荷量のシミュレーションが可能であるかを明らかにする。その際に、水文学的なシミュレーション・モデルの特性について理論的に考察するとともに、実用的な面ではきわめて重要である

モデルのパラメーターの同定と精度の関係についても検討する。そして大小河川の複数の水質項目に2つのタイプのモデルを適用し、推定精度を求めるこにより、水文学的なシミュレーションの可能性の検証を行う。その結果として、2つのタイプのモデルがそれぞれどのような水質項目に対して有用かを明らかにする。さらに、モデルによる晴天時および雨天時の負荷量の分離の可能性などについても検討する。

## 3. 汚濁負荷量の流出特性

ここでは水文学的要因との関連において、河川の汚濁負荷量の流出特性を明らかにする。その内容は、①ポルートグラフの特性解析、②流量規模別にみた水質・負荷量特性、③晴天時と雨天時の負荷量のマクロ的な



図一 ポルートグラフの例(河川①, BOD)

分離についてである。なお、本研究で対象とした河川、水質項目および観測方法等を表-1に示す。

### (1) ポルートグラフの特性

河川の汚濁負荷量の流出状況を、河川①のBODを例として示せば図-1のようになる。同図は、河川①の流量、水質、汚濁負荷量および上流4地点と水質観測地点の降雨を示している。図-1よりわかるように、降雨・流出に応答してBODの水質と負荷量は変化している。この傾向は他の水質項目についてもみられ、その程度は濁度（自とう土に換算した値、Suspended Solidに近い性質をもつ）、 $\text{KMnO}_4$ 消費量（CODに近い性質をもつ）、BOD、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、ABSの順に低くなる<sup>6)</sup>。次に出水時の特性をみるとために、単一出水時の濁度・ $\text{KMnO}_4$ 消費量・ $\text{NH}_4\text{-N}$ の変化特性（河川①）を、流量との関係でみると図-2のようになる。図-2(a)より、单一出水時に流量と水質・負荷量は右まわりのループを描いて変化していることがわかる。したがって、増水時と減水時の流量と水質・負荷量データの関係（最大値で無次元化）をプロットしたレイティング・カーブ（rating curve）を作成すると、図-2(b)のようになり、増水時と減水時について2つのグループ（2本のレイティング・カーブ）がみられることがある。また、図-2(b)よりわかるように、レイティング・カーブ上でのちらばりの程度は、濁度あるいは $\text{KMnO}_4$ 消費量、BOD、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、ABSの順に大きくなっている。

河川①、③を例にとって、降雨・流量と水質・汚濁負荷量の関係を、相関解析により分析すると次のようになる。まず、ポルートグラフ、流量（ハイドログラフ）および降雨（ハイエトグラフ）の自己相関係数を比較すると、図-3(a)のようになる。確率統計水文学の研究により、降雨の波形はランダムで自己相関係数はデルタ関数的であり、流量の波形は低減部の存在のためにゆっくり減衰することが知られている<sup>13)</sup>。図-3(a)に示した降雨・流量および各水質項目の負荷量の自己相関係数を比較すると、負荷量の波形が降雨と流量の中間的なものであり、流量に比べてその減衰が速いことがわかる。流量Qおよび降雨量Rと負荷量Q<sub>s</sub>の相互相関係数を図-3(b)、(c)に示す。図-3(b)(i)より、河川①の全水質項目は、当該日の流量と負荷量とは正の相関にあるが、数日前（河川①の濁度で約5日前）の流量は負に作用していることがわかる。図-3(c)(i)に降雨量Rと負荷量Q<sub>s</sub>の相互相関係数を示す。これと同図中に示すR~Qの相互相関係数とを比較することにより、降雨に対する各水質項目の応答特性を知ることができる。すなわち、流量ほど低減特性がゆるやかではなく、その低減が流量に比較して相対的に速いことがわかる。

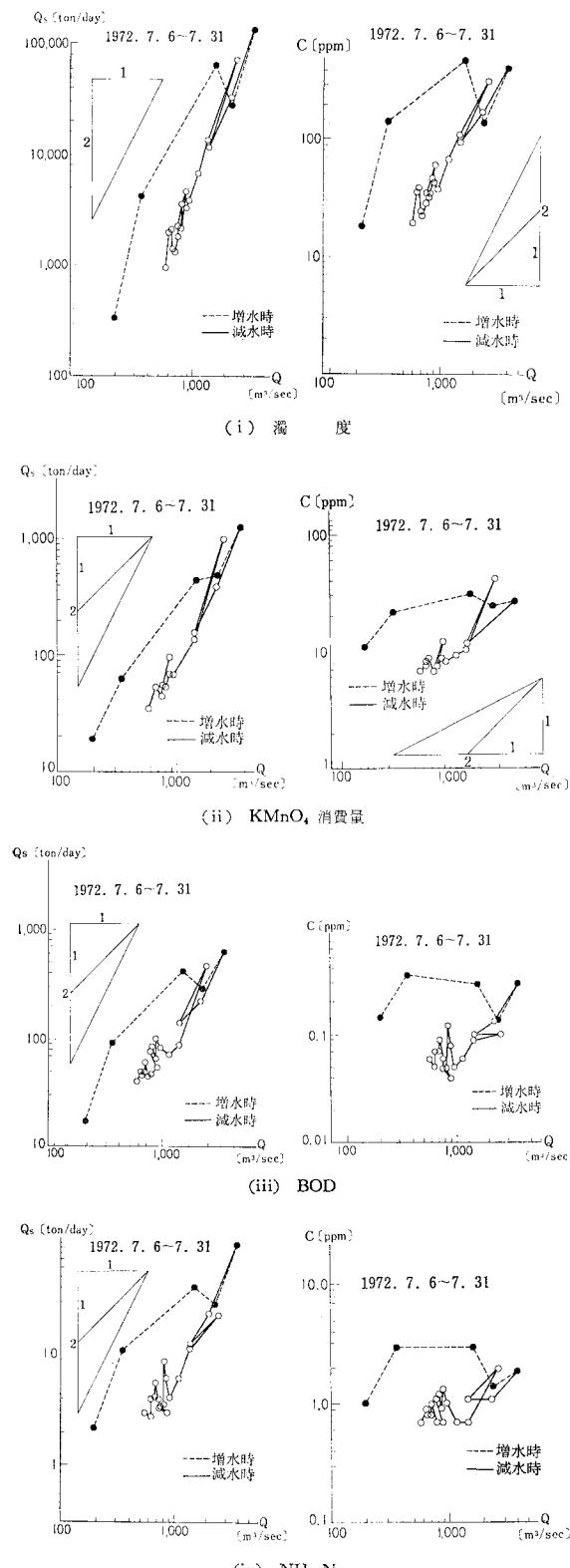


図-2(a) レイティング・カーブ ( $Q_s$ ,  $C \sim Q$  の関係)  
河川①) (单一出水時)

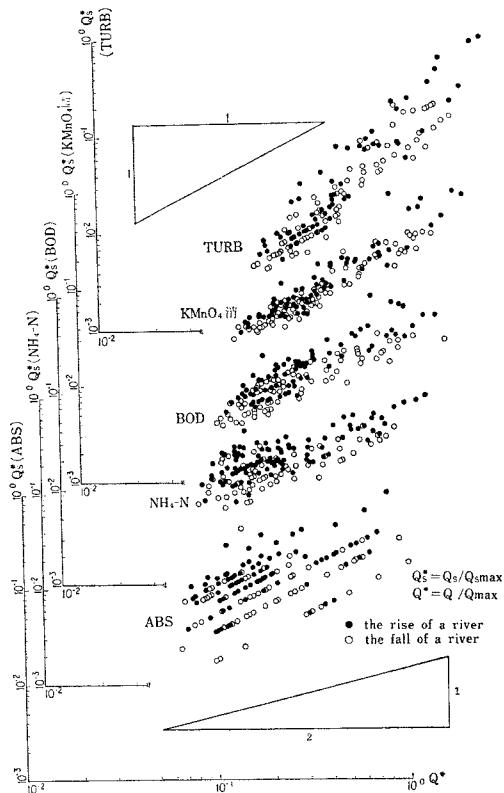


図-2 (b) レイティング・カーブ(河川①)  
(複数出水の重ね合わせ)

また、図-3 (b) (ii), (c) (ii) には  $Q \sim C$  (水質) の相関係数、 $R \sim C$  の相相關係数も示しているが、図-3 (b) (ii) より、河川①の BOD・NH<sub>4</sub>-N・ABS は流量に対して希釈型であり、濁度・KMnO<sub>4</sub> 消費量は当日～数日前の流量に対しては汚濁型であるが、それ以前の流量は希釈に作用していることがわかる。図-3 (c)

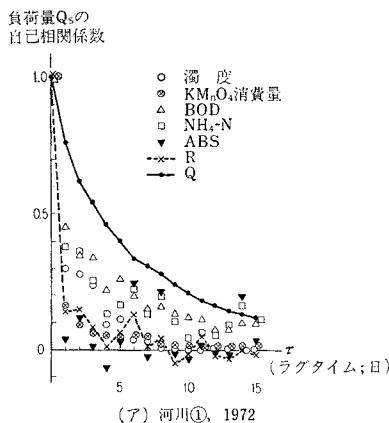
(ii) より、濁度・KMnO<sub>4</sub> 消費量は降雨に対して汚濁型であり、NH<sub>4</sub>-N・ABS は希釈型、BOD はその中間的な型であることがわかる。

流量および水質・負荷量のピーク値の関係を、河川①の濁度、BOD を例として 図-4 (a), (b) に示す。同図で孤立降雨としたものは、前 5 日間にわたり 250 m<sup>3</sup>/sec 以上のピーク出水がなかった場合の出水時のデータであり、前期降雨ありとしたものは前 5 日間の間に 250 m<sup>3</sup>/sec を越すピーク出水があった場合のデータである。それ以外はこれら 2 つに該当しない（ピーク出水はないが 250 m<sup>3</sup>/sec 以上の流量はあった）ものである。同図より、孤立出水時に比較して、連続出水時には同程度のピーク流量に対して水質・負荷量の値は小さいことがわかる。

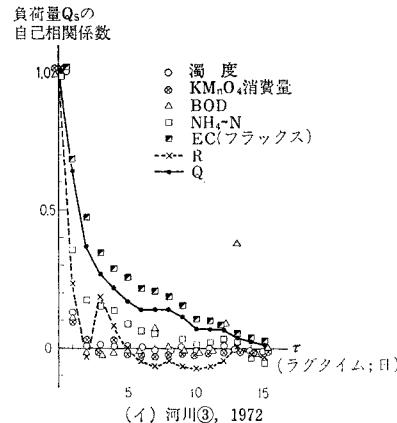
以上の 3 つの特性（ループ特性、水質・負荷量と流量・降雨量の波形の関係、ピーク負荷量の特性）により、ポルートグラフについて次のような概念図が得られる。図-5 (a) に示す出水時の流量に対する水質・負荷量のループ図は図-2(a), (b) および図-3 (a) の特性から、図-5 (b) は図-4 (a), (b) の特性より得られる。図-5 (a) は、水質項目によってその程度は異なるが、流量と汚濁負荷量の関係は、单一出水時において増水時と減水時で異なっていることを示している。図-5 (b) は、先行する出水があると、後の出水時の負荷量はそれがない場合に比較して少ないと、逆に長期間出水がなかった後の出水時には多くの負荷量が流出することを模式的に示している。これらの特性は、後述する水文学的な水質・負荷量シミュレーション・モデルの基本構造として考慮されるべきものである。

## (2) 負荷量の流出特性

上述の (1) において水文学的要因とポルートグラフ



(i) 負荷量  
図-3 (a) 負荷量・水質の自己相関係数



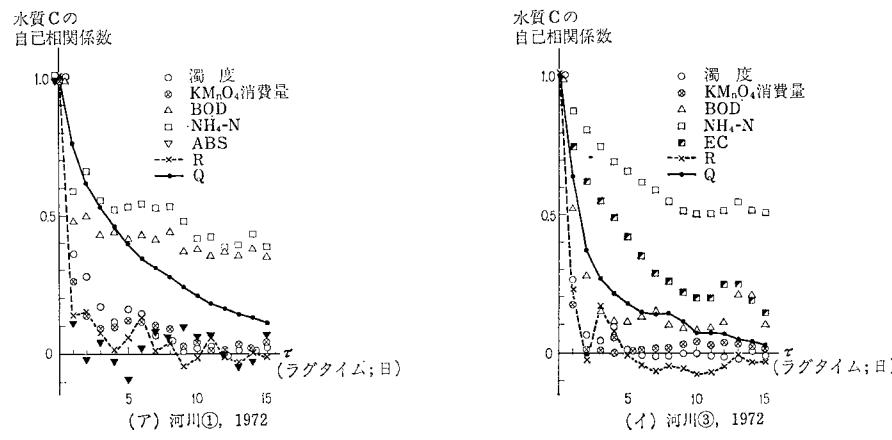
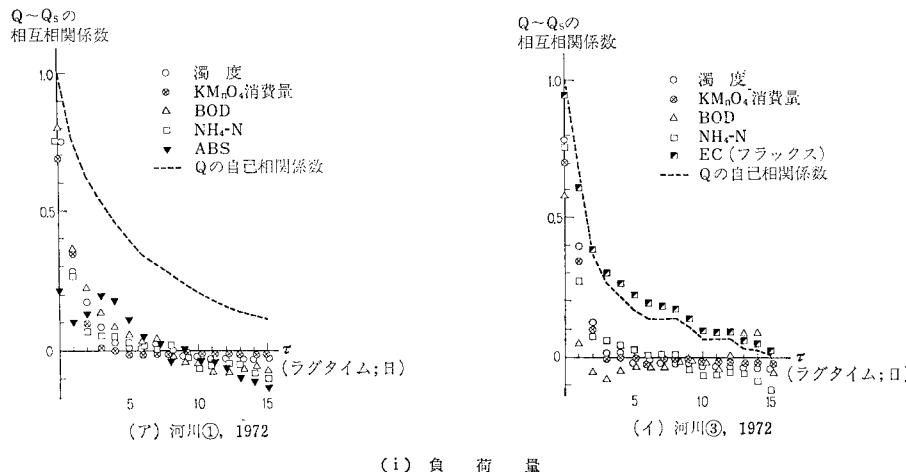


図-3 (a) 負荷量・水質の自己相関係数  
(ii) 水 質



(i) 負 荷 量

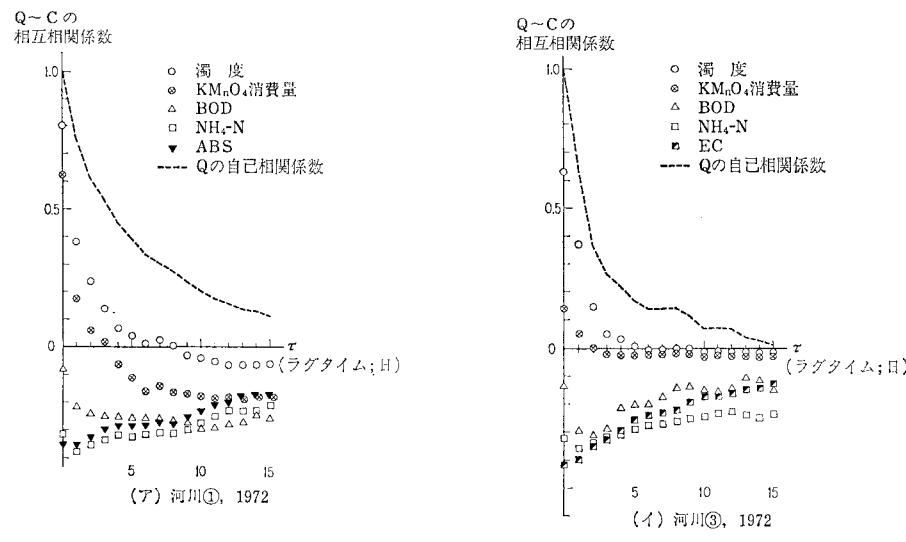
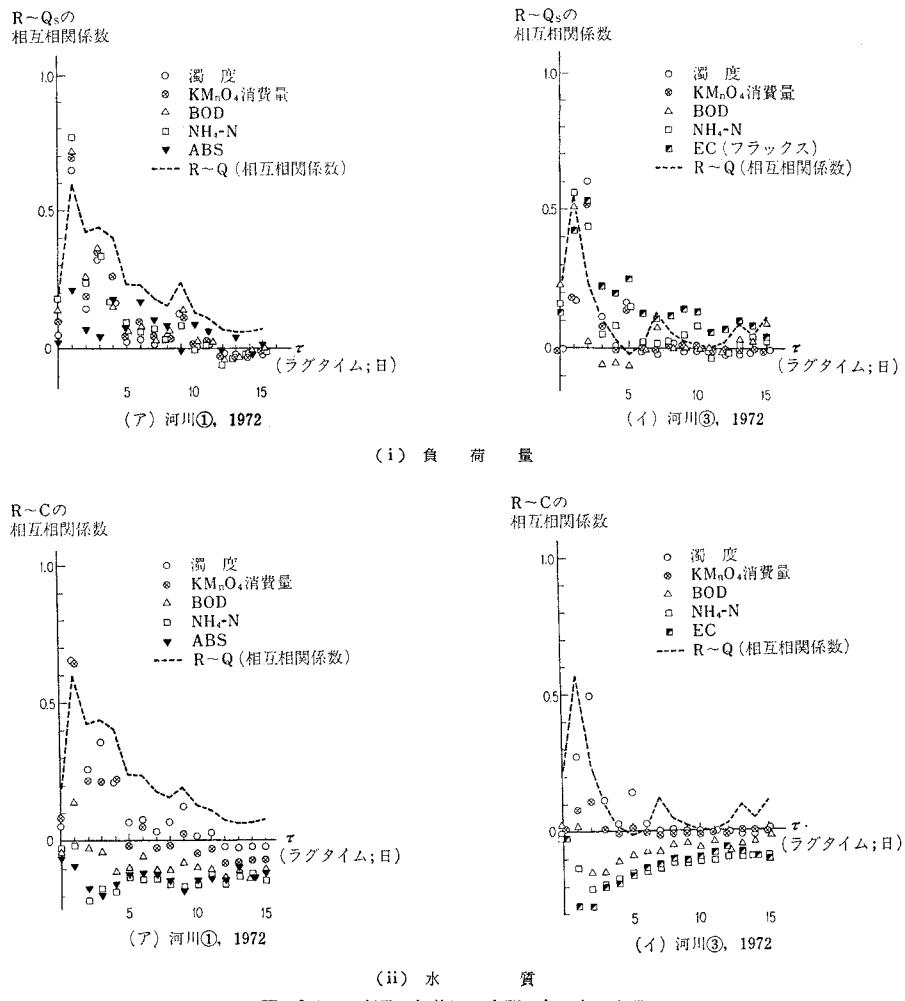


図-3 (b) 流量と負荷量・水質の相互相関係数  
(ii) 水 質

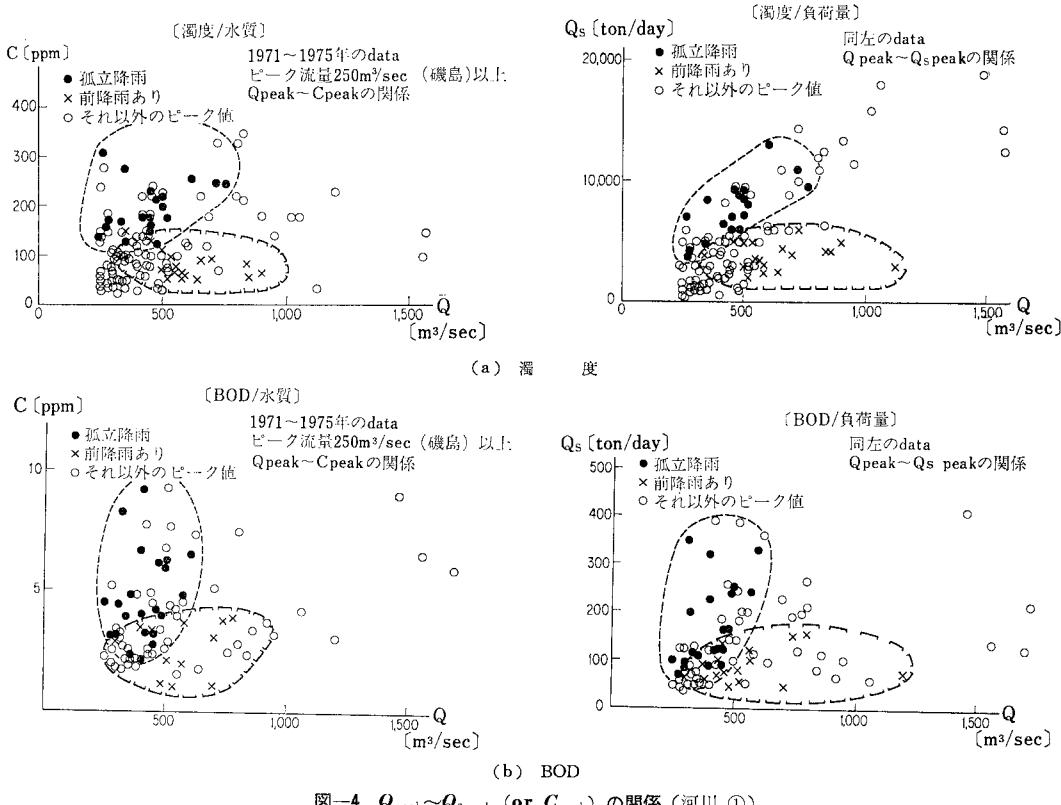


の関係をみたが、ここではマクロ的に流量と水質・負荷量の関係を把握する。そして、その結果を用いて晴天時と雨天時負荷量の分離を行う。

図-6(a)～(d) に河川①の1972～1976年における各規模の流量の発生頻度およびそれぞれの流量規模に対応する平均水質・負荷量を示す。同図より、流量規模が大きくなるにつれて水質が悪くなる濁度・ $KMnO_4$ 消費量が流量に対して汚濁型であり、逆に水質がよくなる $NH_4-N$ が希釈型、あまり変化しないBODが中間的な型であることがわかる（前述の相関解析でも同様の結果が与えられている）。なお、 $Q_s$ あるいは $C$ と $Q$ の関係( $Q_s$ ,  $C \sim Q^n$ )を、複数の河川についてタイム・スケールを日・月として同定したとき、および流量規模ごとの平均としてみた場合の平均的な巾数 $n$ を表-2に示す。表-2よりマクロ的な流量と水質・負荷量の関係を知ることができる。すなわち、 $C \sim Q^n$ の巾数について、 $n > 0$ は汚濁型、 $n < 0$ は希釈型、 $n = 0$ は中間型の水質

項目であることがわかる。

図-7に示すような2つの分離方法により晴天時と雨天時の負荷量を分離すると、図-8(1), (2)のようになる。前者の分離をベース・フロー(base flow)分負荷とストーム・フロー(storm flow)分負荷の分離、後者をドライ・ウェザーデイ(dry weather day)分負荷とストーム・ウェザーデイ(storm weather day)分負荷の分離とよぶことにする。前者は晴天時に出ている負荷量と降雨・流出により増大して出ていく負荷量の分離であり、後者は晴天時と雨天時に出る負荷量の分離をそれぞれ意味している。それぞれの分離においては、分離のための基準流量を与える必要がある。図-8(1)は、従来から用いられている流量規模の分類に対応させて、それを低水流量時の負荷量を基準とした場合、および低水流量以下の平均負荷量を基準とした場合について示している。また、図-8(2)は基準流量を流量規模上位5%, 10%, 25%, 50%および75%とした場合のもので

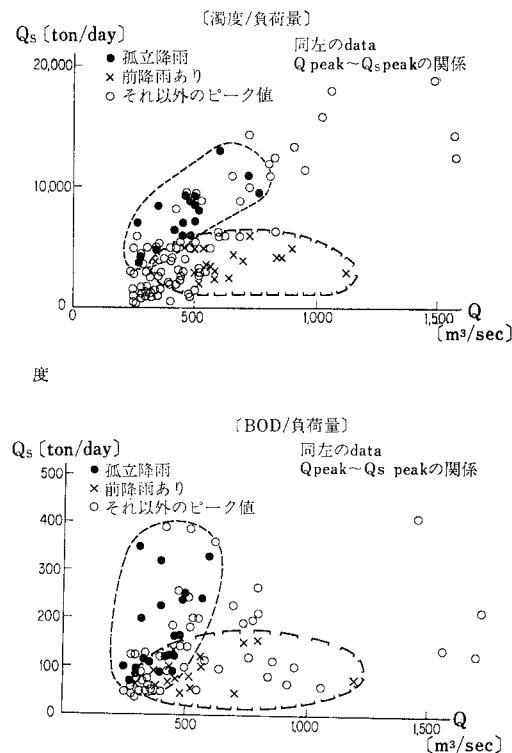


ある。図-8(1),(2)より、河川ごとにちらばりはみられるものの、濁度・ $KMnO_4$ 消費量はその多くが降雨・流量に対応して流出しており、晴天時に対応している負荷量は少ないことがわかる。したがって、雨天時の負荷量が相対的に重要である。一方、BOD・ $NH_4^-$ ・N・ケルダール窒素・TOC・T-Pなどは晴天時にも負荷量が相当流出しており、雨天時と同様に晴天時の負荷量も重要なことがある。

なお、水質項目ごとの流出特性と流域の地形・地質、社会活動指標・および水文学的要因とのマクロ的な関係を、本論文および参考文献6), 19)の解析をもとに整理すると表-3のようになる。この表は、流域条件の異なる7河川のデータの比較分析を通じて得られたものであり、必ずしも厳密ではないが、一般的な傾向を示すものであり、以下の考察の基本となるものである。

#### 4. 水文学的な水質・負荷量のシミュレーション

ここでは、まず水文学的な水質・負荷量シミュレーション・モデルの考え方を分類し、モデルについての理論的な考察を行う。次に2つのタイプのシミュレーション



ン・モデルを提示し、前述の複数河川の複数水質項目に対してそれを適用し、その適合性について検討する。そしてその結果を用いて、どのような水質項目にはどのタイプのモデルが適合するか、また水文学的要因により河川の汚濁負荷量がどの程度の精度でシミュレーションできるかについて記す。

##### (1) 水文学的なシミュレーション・モデルの分類

従来の水文学的なシミュレーション・モデルの基本的な考え方には2つのタイプがある。1つは流量  $Q$  や降雨量  $R$  を説明変数とする式(1)で示されるようなものである。このようなモデルは汚濁負荷を流送する能力に着目したものであり、ここではこれを「流送能力」型モ

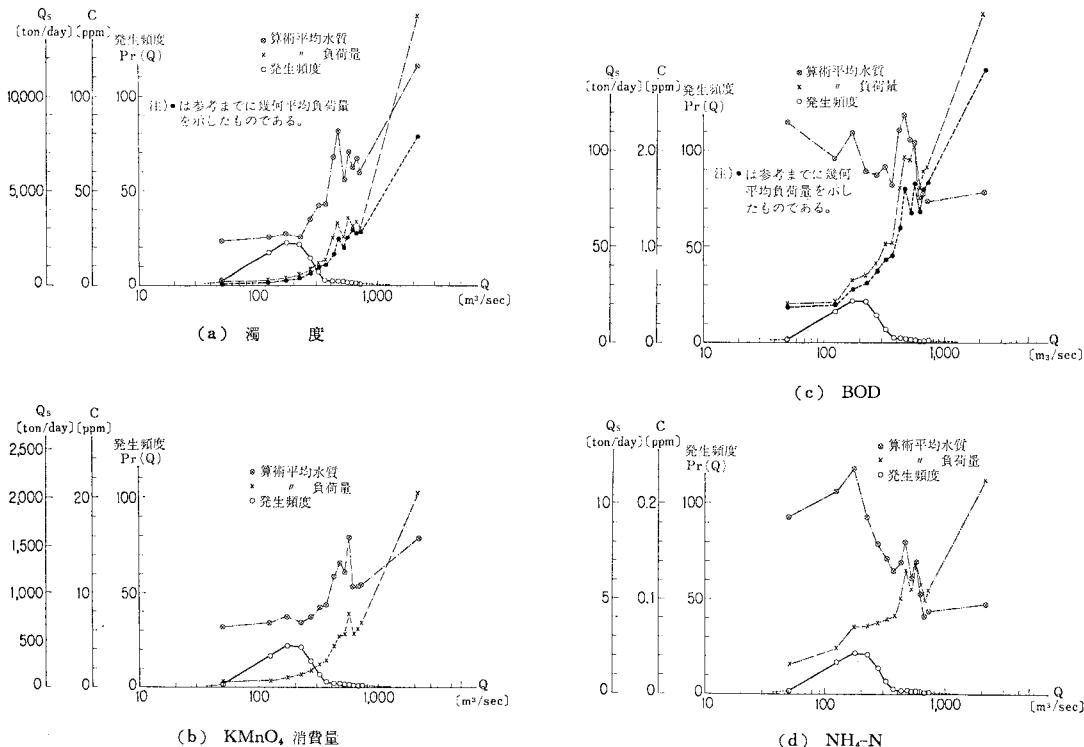


図-6 流量の発生頻度と平均水質・負荷量(河川①)

表-2  $Q_s$  あるいは  $C \sim Q^n$  としたときの  $n$  の値

データ 水質項目	日変化		月変化 (複数河川)	流量規模別 (複数河川)
	出水時 (河川①のみ)	日データによる回帰式より		
濁度	$Q_s \sim Q^{2.2-2.5}$ $C \sim Q^{1-2}$	$Q_s \sim Q^{1.6-1.9}$ $C \sim Q^{0.5-0.8}$	$Q_s \sim Q^2$ $C \sim Q$	$Q_s \sim Q^2$ $C \sim Q$
$\text{KMnO}_4$ 消費量	$Q_s \sim Q^{1.5-2}$ $C \sim Q^{0.5}$	$Q_s \sim Q^{1-1.2}$ $C \sim Q^{0-0.2}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$
BOD	$Q_s \sim Q^{1.5}$ $C \sim Q^{0-0.5}$	$Q_s \sim Q^{0.6-0.8}$ $C \sim Q^{0.3-0.4}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$
$\text{NH}_4\text{-N}$	$Q_s \sim Q^{1-2}$ $C$ (明確な関係なし)	$Q_s \sim Q^{1.1-1.2}$ $C \sim Q^{-0.6-0.1}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^{-0.5}$	$Q_s \sim Q^{0.5}$ $C \sim Q^{-0.5}$
TOC	—	$Q_s \sim Q^{1-1.1}$ $C \sim Q^{0.1-0.3}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^{-0.5}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$
T-P	—	$Q_s \sim Q^{0.7-1.1}$ $C \sim Q^{-0.3-0}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$
ケルダール窒素	—	$Q_s \sim Q^{0.5-1.1}$ $C \sim Q^{-0.2-0}$	—	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$
EC	—	$Q_s \sim Q^{0.7}$ $C \sim Q^{-0.3}$	$Q_s \sim Q^{0.7}$ $C \sim Q^{-0.3}$	—

注) これらの式を得るために使用したデータの期間や年度は必ずしも整合がとれていない。したがって、定性的な  $Q_s$ ,  $C$  と  $Q$  の関係をみるためのものである。

モデルとよぶことにする。

$$\left. \begin{array}{l} Q_s \\ C \end{array} \right\} = \text{func.}(Q) \text{ or } \text{func.}(Q, R) \dots \dots \dots \quad (1)$$

あと 1 つは汚濁負荷量のポテンシャル  $S$  をも導入し

表-3 汚濁負荷流出量の支配要因

水質項目	指標	流域の地形・地質	社会指標	水文学的要因 (降雨あるいは流量)
			(農林業工場, 事 業所, 人口, 下 水道整備率など)	
濁度	◎			◎
$\text{KMnO}_4$ 消費量	◎		○	○
BOD	△		○	○
$\text{NH}_4\text{-N}$			○	○
ABS			○	○
ケルダール窒素			○	○
TOC	△		○	○
T-P	△		○	○
EC	○		△	○

注 1) ◎: 重要な支配要因, ○: 支配要因の 1 つ, △: 関係は認められる, 空白: 関係が明白ではない。

注 2) 社会指標は、流域面積に対する比(たとえば人口密度や山林・農地面積など)として考えている。

注 3) 水文学的要因以外の指標は後述の水文学的なシミュレーション・モデルのパラメーターを支配する。

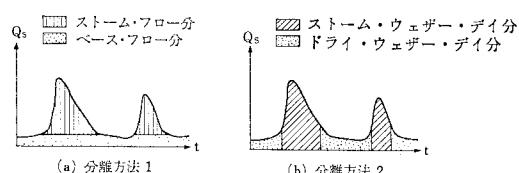
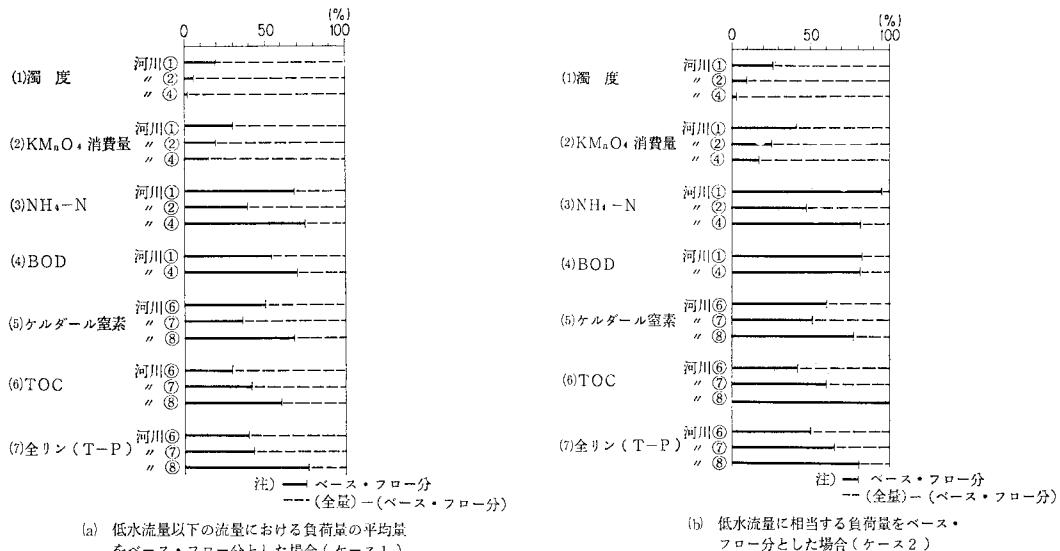
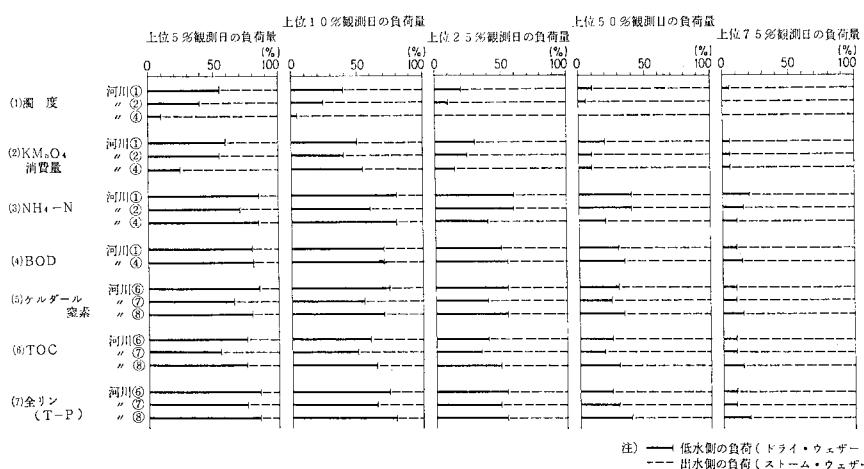


図-7 分離方法の概念図

たモデルであり、式 (2)～(4) のように表わされ、ここではこのようなモデルを「流送能力・供給関数」型モ



(1) 分離方法1による分離



(2) 分離方法2による分離

図-8 汚濁負荷量の分離結果

ルとよぶことに対する注2).

$$\left. \begin{array}{l} Q_s \\ C \end{array} \right\} = \text{func.}(Q, S) \text{ or } \text{func.}(Q, R, S) \dots (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = S_{in} - Q_s \dots (3)$$

$$S_{in} = f(t) \dots (4)$$

ここに、式(2)は汚濁負荷量の流送に関する方程式(運動方程式と考えてよい)、式(3)は汚濁負荷量ポテンシ

注 2) このタイプのモデルは、3. の汚濁負荷量流出特性の解析結果(図-5(a), (b))と原理的に対応している。しかし、このモデルにおいて  $S$  が水文量の関数である場合(たとえば濁度のように雨が降ればその程度により  $S$  が決まる場合)には、「流送能力」型モデルと等価である。したがって、 $S$  を支配する式(3)は、概念として汚濁負荷量の「蓄積」を考えたものであり、「蓄積」的ではなく降雨による「浸食」といった概念は示していない。

ヤルの連続式、式(4)は流出する汚濁負荷量の供給を示すものであり、 $S_{in}$  は負荷量の供給関数である。以上のような基本的な考え方に基づくモデルのうち代表的なものを表-4, 5 に示す。同表には各モデルの形式・作成者・モデルの形および発表年を示す。「流送能力」型モデルでは、同時刻の流量やある一定時刻の降雨のみを説明変数とする場合には、同じ降雨・流量条件のもとでは同一の負荷量が流出することになる。ただし、前期降雨(あるいは先行晴天日数)などを説明変数に加えれば、連続出水時に負荷量が減少すること(あるいは長期間流出がなかった場合には増大すること)を説明することもできないことはない。また、増水時と減水時のループ特性については、水位や水面勾配などの特別な関数形を用いることにより、「流送能力」型としてある程度説明す

表-4 「流送能力」型のモデル

Straub (1935) 吉川 (1952) Gunnerson (1967)	Hart ら (1964)	羽田 (1977) 山口・吉川 (1978)	山口・吉川 (1978)
$Q_s = aQ^b$	$Q_s = a_0 Q_0 + a_1 Q_1 + a_2 Q_2$ (あるいは) $= a_0 Q_0^{b_0} + a_1 Q_1^{b_1} + a_2 Q_2^{b_2}$	$Q_s = aQ^b + f(R)$	$Q_s = f(Q, R) = \sum_{i=1}^k a_i Q_i + \sum_{i=1}^k b_i R_i$ (あるいは) $= \sum_{i=1}^k a_i \ln Q_i + \sum_{i=1}^k b_i \ln R_i$ ここに $i$ : 流量地点・時間示すインデックス

表-5 「流送能力・供給関数」型のモデル

EPA (SWM model)* (1971) Sartor (1972)	稻場* (1975)	山口ら* (1976, 1978)	淀川工事事務所 (1974)	高畠ら* (1976)	Hall*** (1970)
$\begin{aligned} & \left. \frac{dS}{dt} = krS \right\} \text{地表モデル} \\ & S = S_0 + \bar{S}AT \end{aligned}$ ここに, $S_0 = S(t=0)$ $AT$ : 行先晴天日数 $S$ : 残留量 $r$ : 降雨強度	$Q_s = kQ^{1.5}$ $\frac{dS}{dt} = rS_{in}$ すなわち $S = S_0 + rS_{in}AT$ ここに, $r$ : 残留率	$Q_s = aQ^b S^c$ $\frac{dS}{dt} = S_{in} - Q_s$ $S_{in} = \text{const.}(t)^{**}$ (あるいは) $= f(R)$	$Q_s = f(Q)f(S) \cdot Q$ $\frac{dS}{dt} = S_{in} - Q_s$ $S_{in} = \text{const.}$	$Q_s = -\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot S$ $S = S_0 + rS_{in}AT$ (あるいは) $\frac{dS}{dt} = rS_{in}$ ここに, $V$ : mixing volume	$Q_s = f(Q)$ $a_1 Q^a$ (Model 1) $a_2 Q^a + cQ$ (Model 2) $a_3 Q - b_1 Q \log Q$ (Model 3) $a_4 Q \exp(-b_2 Q)$ (Model 4) $\frac{(a_7 - c_0)Q}{1 + b_4 Q^c} + c_0 Q$ (Model 5)

\*: 下水道についての model. \*\*: 晴天時の時間分布を与えることもある. \*\*\*: 原文は濃度  $c$  について述べている.

\*\*\*\*: 各モデルともに負荷量ボテンシャルの上限を設けることもある.

することはできる<sup>1), 5), 14)</sup>.

## (2) 2つのタイプのモデルの関係

両タイプのモデルの関係をみるために、式(1)および式(2)を次のように単純化した場合について考える。

$$\begin{aligned} Q_s \Big\} &= \text{func.}(Q) = aQ^b \quad \dots \quad (1)' \\ C \Big\} &= \text{func.}(Q, S) \\ &= \text{func.}(Q) \cdot \text{func.}(S) \\ &= a'Q^{b'}S^{c'} \quad \dots \quad (2)' \end{aligned}$$

ここに、 $a, b, a', b', c'$  は定数である。

式(2)', (3), (4)を連立して  $Q_s$  について解くと次のようになる。

$$Q_s(T) = a'Q^{b'}(T) \cdot \left[ S_0 + \int_0^T (S_{in}(t) - Q_s(t)) dt \right]^{c'} \quad \dots \quad (5)$$

ここに、 $S_0$  は  $S$  の初期値である。

したがって、「流送能力・供給関数」型のモデルでは、負荷量ボテンシャル  $S$  の程度（式(5)の  $\sim\sim\sim$  線部分で示される）により、流出負荷量が修正されていると考えることができる。すなわち、先行晴天期間（日数）の程度による流出負荷量の変化や連続出水時の流出負荷量の減少がこの項で補正されていると考えることができる。なお、高畠らの混合モデルにおいては、基本的には式(5)を次のように単純化して近似するが、本質的に同

様の操作を行っている（ただし、出水期間中の  $S_{in}$  は考慮しないことが多い）。

$$S = S_0 + r \cdot S_{in} \cdot AT \cdot n \quad \dots \quad (6)$$

$$Q_s = -\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot S \quad \dots \quad (7)$$

ここに、 $r$ : 残留率、 $AT$ : 期間のタイム・スケール、 $n$ : 行先晴天期間数、 $V$ : ミキシング・ボリューム (mixing volume) である。

以上が「流送能力」型および「流送能力・供給関数」型モデルの基本構成と両者の基本的な関係である。本研究では、「流送能力」型モデルを実河川に適用するにあたり、当初、式(1)'を用いたが精度的に十分ではなかったために、式(1)'に定数項（ベース・フローに対応する項）を加えた次式で示されるモデルを採用した。

$$\begin{aligned} Q_s \Big\} &= A_0 + (-1)^M a(|Q - Q_0|)^b \\ &\left[ \begin{array}{l} Q > Q_0 \rightarrow M=2 : (a > 0) \\ Q < Q_0 \rightarrow M=1 \end{array} \right] \quad \dots \quad (8) \end{aligned}$$

「流送能力・供給関数」型モデルについても、同様にして  $Q_s = A_0' + (-1)^M a'Q^{b'}S^{c'}$  とすることも可能であるが、パラメーターはできる限り少なくしたいこと、およびシミュレーション結果の適合性からみて式(2)'で示される  $a'Q^{b'}S^{c'}$  の形を採用した。

図-9に、式(8)、式(5)および式(6)・(7)の実河川（河川①のBOD, NH<sub>4</sub>-N）への適用例を示す。同図に示すシミュレーションは、それぞれのモデルを2か月

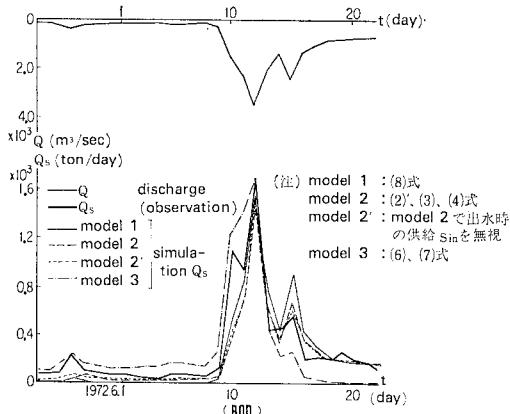


図-9(a) 水文学的なモデルによるシミュレーション(モデル間の比較)その1(河川①)

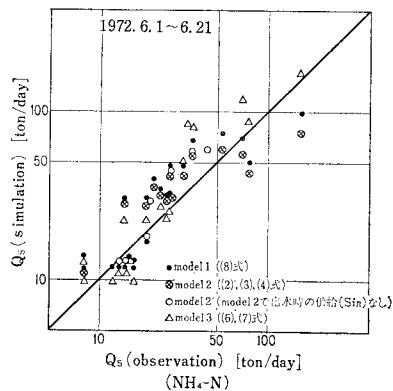


図-9(b) 水文学的なモデルによるシミュレーションその2(河川①)

間(1976年5月1日～6月31日)のデータを用いて同定(training)したときのものである。式(8)のモデル(モデル1)については最小2乗法によりパラメーターを定めた。式(5)のモデル(モデル2)については、 $S_{in}$ を年間平均の日流出負荷量、 $S$ の初期値 $S_0$ を $20 \times S_{in}$ とし、 $Q_s = kQS$ とし定数 $k$ を定めた。また、式(5)において出水時の負荷量供給を無視したもの(モデル2')も同図中に示した。これら4つのタイプのモデルによるシミュレーション精度は、定数の設定および同定方法などによるので、同図において精度を比較することは本質的に意味がない。しかし同図よりこれらのモデルの定性

注3) 後述の感度分析に示すように、 $S$ の初期値 $S_0$ の与え方による影響は、ある程度の区間を経過すると消失する傾向にある。しかし、モデルを同定する際には $S_0$ の値の与え方により得られたモデルの精度が異なり、ここでは安定した結果を得るために何回かの試行の後この値を採用した。

的な関係は理解されよう。すなわち、同じ流量に対して常に同じ負荷量の流出を示す「流送能力」型のモデル1では、最初の出水の低減部分における急激な負荷量の落ち込みおよび次の小出水時における流出負荷量の減少を十分に説明していない。これはこのモデルの一般的な特質である。一方、「流送能力・供給関数」型のモデル2, 2', 3は、必ずしも十分でないが、それぞれ上述の負荷量流出特性を表現する傾向が認められる(精度的に十分でないのは $S_0$ ,  $S_{in}$ といったパラメーターの与え方および同定区間のとり方による)。

なお、図-9に示した区間は、感度分析により $S_0$ の与え方による影響が顕著でなくなる区間(シミュレーションを始めて40日以降)について示している。

### (3) 本研究で用いたパラメーターの同定

「流送能力」型モデル(式(8))では、同定すべきパラメーターは $A_0$ ,  $a$ および $b$ である。これら3つのパラメーターは、 $Q_s$ を低水流量として与えて最小2乗法により同定した。ただし、モデル1の最小2乗法による同定方法には2つあり、1つはレイティング・カーブの勾配から $b$ を定めた後に $A_0$ ,  $a$ を定める方法、あと1つはまず $A_0$ を低流量時の平均的な負荷量などに固定して $a$ ,  $b$ を定める方法である。以下に示すものはすべて前者の方法によっている。

「流送能力・供給関数」型モデル(式(5))では、 $S_{in}$ としては $S_{in} = \text{constant } A$ ( $Q_s$ の年間平均値)とする場合、および $S_{in} = \text{constant } B + f(R)$ (ただし、 $T$ が十分の場合には、 $\frac{1}{T} \int_0^T S_{in} dt = \text{constant } A$ )について検討したが、主として前者を用いた。モデル2の同定においては、 $S_{in}$ のほかに $S_0$ も与える必要があるが、 $S_0$ については図-9に示すモデルの同定において与えたのと同様にした。

次に、2つのモデルにおいて各パラメーターが推定値に与える影響を把握しておくことは、パラメーター同定において重要なことである。そのため行った感度分析の結果を図-10に示す。同図はある出水期について例示したものであるが、これにより各パラメーターの変化が結果に与える定性的な影響を知ることができる。

すなわち、同定したモデルの定数を一応2割増減させて感度分析をすると、「流送能力」型のモデル1では、 $A_0$ の変化がシミュレーション値に与える影響は式(8)が示すように加算的なので相対的に鈍く、巾数 $b$ には指数なので敏感であり、 $Q^b$ の倍率である $a$ にはその中間に応答する。「流送能力・供給関数」型のモデル2では、 $a$ および $b$ についてはモデル1とほぼ同様であり、 $c$ ,  $S_{in}$ ,  $S_0$ の変化に対しては同図が示すように相対的に鈍

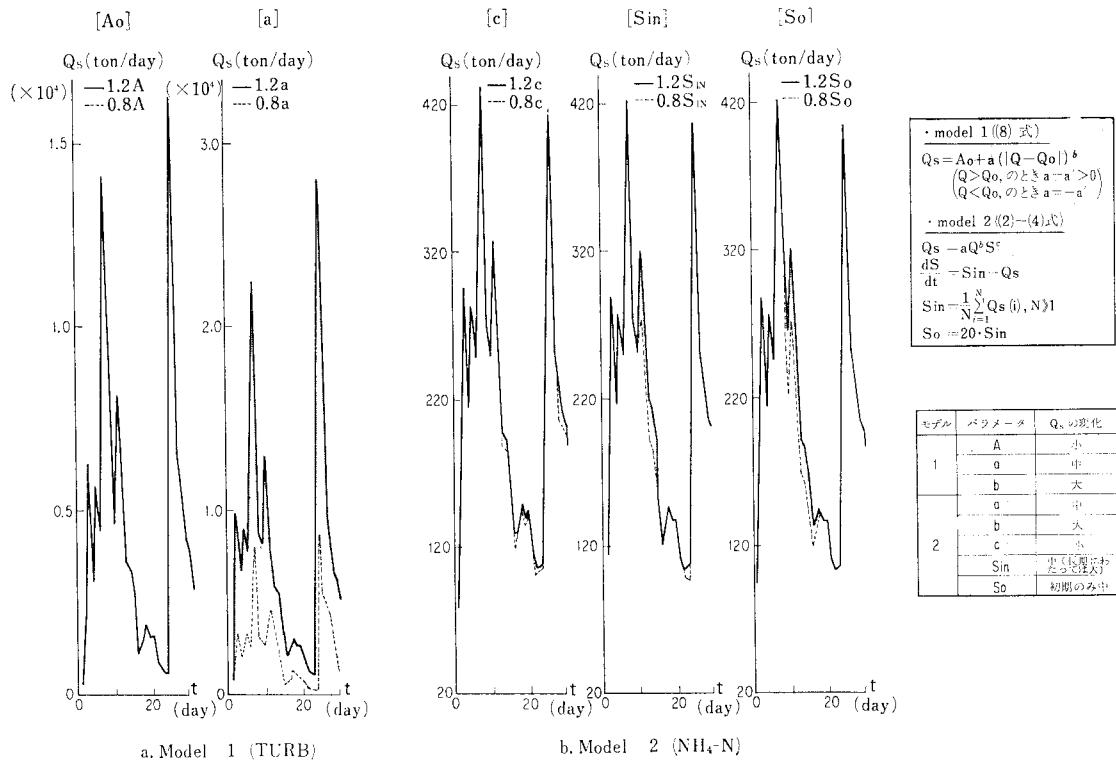


図-10 感度分析の例 (河川①)

い。ただし、 $S_{in}$ については長期間のシミュレーションでは徐々に誤差が累積されてゆき、 $S_0$ についてはその変化による誤差はある程度の区間が過ぎると消失する。したがって、前述の  $S_0$  の与え方、および比較的長期間のシミュレーションを前提として  $S_{in}$  を年間平均の  $Q_s$  として与えたことが妥当であることを、これらの結果は裏付けている。以上は比較的高流量についてみた場合のことである。低流量時に対してもほぼ同様のことがいえるがここでは省略する。

各モデルの定数決定においては、同定区間 (training interval) と検証区間 (checking interval) を設定して、作成されたモデルの精度をチェックした。その結果、あらかじめ予想されたことであるが、水文学的なモデルは高流量を含む同定区間においてモデルを同定した場合の方がシミュレーションの精度が高いことがわかった。そこで以下のモデルは出水期を含む区間でモデルの同定を行つ

た。

河川①を例として、同定区間および検証区間を変えたときの精度について検討した結果を図-11に示す。ここに、 $R$  はシミュレーション値と実測値の相関係数、 $E$  は検証区間内の総負荷量としての誤差、 $M$  は検証区間内の総負荷量に着目して定義した平均誤差率 ( $M$

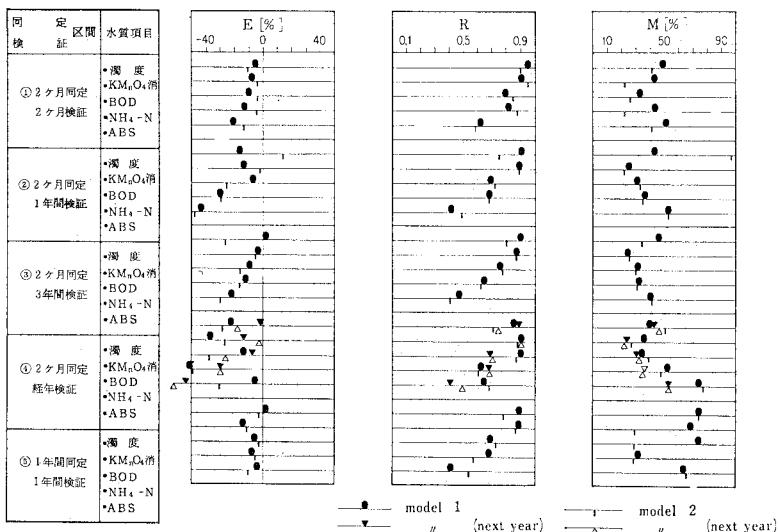


図-11 同定および検証区間と予測精度

$$= \sum_{i=1}^n W_i \cdot \Delta Q_s(i) / Q_s(i), \quad W_i =$$

$$Q_s(i) / \sum_{i=1}^n Q_s(i), \quad Q_s(i) : \text{実測}$$

値,  $\Delta Q_s(i)$  = シミュレーション値 - 実測値) である。水質項目ごとにみると、相関係数  $R$  については同定区間および検証区間のとり方にかかわらず、両モデルとも濁度あるいは  $KMnO_4$  消費量、BOD,  $NH_4-N$ , ABS の順に小さくなっている。総負荷量の誤差  $E$  および平均誤差率  $M$  は、 $KMnO_4$  消費量、BOD,  $NH_4-N$ , ABS の順に大きくなっている傾向にあるが、必ずしも明確ではない。②および④の結果を比較してみると、1年間で同定すると2か月間で同定した場合より総負荷量の誤差は

小さくなっているが、平均誤差率はむしろ大きくなっている。また、⑤の結果でみると、 $KMnO_4$  消費量や BOD についてはトータルの誤差が相当大きく生じておらず、経年的な特性が正しくモデル化されていないことがわかる。また、①, ②, ③, ⑤の結果において、総負荷量の誤差がほとんどすべて負に出ており、これは同定区間内のデータに低流量時のものが相対的に多く含まれていたことによると考えられる。また、2か月間のデータで同定して経年的(経時的)に検証を行うと、「流送能力・供給閾数」型のモデルでは、誤差が非常に大きくなること(たとえば、ある年度の河川①の ABS については年間総負荷量の約2倍)がある。これは、汚濁負荷の供給  $S_{in}$  をモデルを同定した年度の年間平均値としているためであり、実用上は  $S_{in}$  の与え方が重要な課題となることを示している。したがって、今後の課題として供給閾数  $S_{in}$ (たぶん、流域の地質・地形条件、社会活動状況および水文学的要因などの閾数であると想像される)<sup>6)</sup>の解明が重要であることがわかる。

図-12には、複数河川の複数水質項目に対して2つのタイプのモデルを適用し、2か月間のデータでモデルを同定した場合のシミュレーション結果を示す。同図には、前述の  $E$ ,  $R$ ,  $M$  のほかに、シミュレーション・モデルによるベース・フロー分(B.F.)とストーム・フロー分(S.F.)の負荷量の分離、およびドライ・ウェザー・ディ分(D.W.D.)とストーム・ウェザー・ディ分(S.W.D.)の負荷量の分離を行ったものを、実測値から分離したものと併記して示している。ただし、ここでは分離の基準を低水流量としている。これにより、シミュ

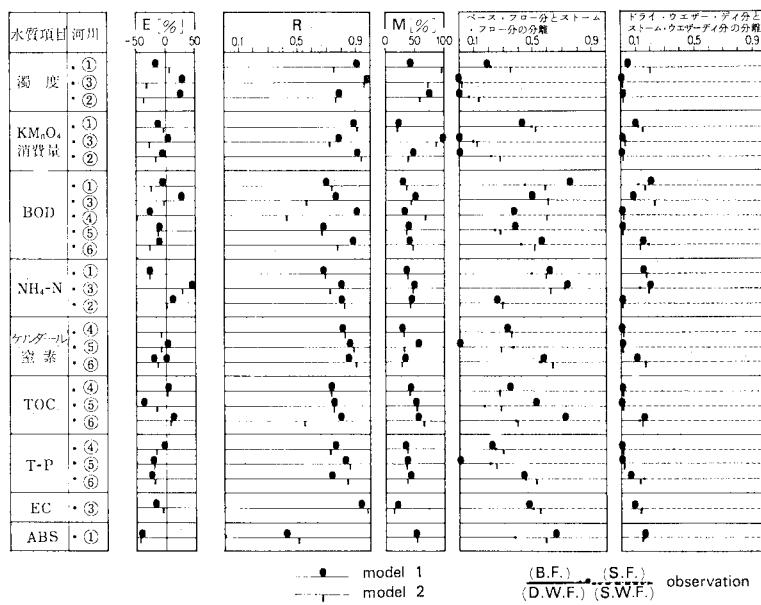


図-12 シミュレーション結果

レーションによる分離の精度についても知ることができる。

なお、モデルの同定に際しては、 $Q_s = \text{func.}(Q)$  あるいは  $Q_s = \text{func.}(Q, S)$  としてモデルを一次的に同定し、その段階で生じている誤差  $\bar{E}(t)$  [(実測値) - (シミュレーション値)] を  $\bar{E}(t) = \text{func.}(R)$  あるいは  $\bar{E}(t) = \text{func.}(R, S')$  などとして段階的に同定して注4)、精度の向上を図ることについても検討したが、モデルの同定はできる限り簡潔にすることを指向したこと、および本論文では水文学的要因によるシミュレーションの可能性について検討しているので、“モデルいじり”に陥るのは避けたかったことなどにより、そのような方法は採用しなかった。

## 5. シミュレーション結果による考察

図-12に示すシミュレーション結果(2か月間データで同定、1年間データで検証)により次のことがわかる(図-12には図-8の結果を併記している)。

① 本研究で用いた水文学的なモデルによるシミュレーションの年間総負荷量としての誤差  $E$  は、大規模河川の濁度、 $KMnO_4$  消費量、BOD,  $NH_4-N$ , EC などは約

注 4)  $\bar{E}(t)$  は前述の平均誤差率  $M$  とは異なるものであり、各時刻における実測値とシミュレーション値の誤差そのものである。 $M$  はある検証区間における相対誤差の加重平均値であり、検証区間全体としての相対誤差を示している。ここでいわんとすることは、各時刻におけるボルトグラフに合致するモデルに同定することを考えることである。

0~30% である。

② 同様に実測値と推定値の相関係数  $R$  は 0.70~0.95 程度である。また、平均誤差率  $M$  は約 40% 程度である。

③ ポルートグラフのシミュレーション精度は、EC、濁度あるいは  $KMnO_4$  消費量、BOD、 $NH_4-N$  の順に低くなる。これは人為的な排出源からの負荷量と水文要因の対応があまりよくないことと一致している（表-3 参照）。

④ EC、 $KMnO_4$  消費量、濁度はパラメーターの数が少なく同定も容易な「流送能力」型のモデルで十分にシミュレーションすることができる。BOD、 $NH_4-N$  のように人為的な排出源に主として依存すると考えられる水質項目については、「流送能力・供給関数」型の方が適合性がよい傾向にある。

⑤ ABS に対しては水文学的なモデルの適合性が悪い（水文学的要因によるシミュレーションが難しい）。

⑥ また、モデルの同定に関しては、次のようなことがいえる。本モデルのような水文学的なモデルの定数は低流量時のデータを多く含む同定区間よりも、高流量時のデータを多く含む同定区間において同定した方が、年間を通じてのシミュレーションでは精度が高い傾向にある。

また、図-12 に示す負荷量の分離結果から次のことがわかる。

① 水文学的なモデルによりベース・フロー分とストーム・フロー分の比率は、0~10% 程度の誤差で推定することができる。

② ドライ・ウェザーデイ分とストーム・ウェザーデイ分の比率は、0~10% 程度の誤差で推定することができる。

以上の考察は、モデルの定数を上述のような前定のもとで単純な統計的手法により同定した場合の結果であり、今後の課題としては、シミュレーションの適合性（たとえば各時刻のポルートグラフの適合性、あるいは年間総負荷量に対する適合性）を最大にするような同定手法（あるいは同定理論）の導入が考えられる。

## 6. 結 語

本研究の結果明らかとなったこと、および今後の課題を列挙すれば次のようになる。

① 河川の水質・負荷量の流出特性を、水文学的な観点から基礎的な分析を行い、それに基づいて汚濁負荷量の流出特性の概念図を示した。

② 晴天時と雨天時の汚濁負荷流出量の分離を行い、停滞水域の水質を保全するために汚濁負荷量の総量規制

を行う場合には、降雨流出を介して流出する負荷量が相対的に重要であることを定量的に示した。

③ 水文学的な水質・負荷量シミュレーション・モデルについて理論的な考察を行い、2つの基本的なタイプのモデルを提案した（「流送能力」型、「流送能力・供給関数」型）。また、それらのモデルの関係を明確にするとともに、基本特性を分析した。

④ 2つのタイプのモデルを複数河川・複数水質項目に適用してその精度について検討し、水文学的なモデルによるシミュレーションの可能性、および各水質項目に對してどのタイプのモデルが適合するかを明らかにした。さらに水文学的モデルによる負荷量の分離の可能性を示した。

今後の課題としては次のようなものがある。

① シミュレーションの適合性を増すための定数の同定手法を開発・導入する。

② 本研究では河川のある1基準点の水質・負荷量について考察したが、停滞水域の環境保全・改善計画を策定するためには、負荷発生源とある地点への流出負荷量の関係を明らかにする必要がある。そして、河川汚濁負荷量の形成関数を作成し、規制・対策の効果を明確にすることが望まれる。

③ 停滞水域へ流入する負荷総量を、限られた回数の観測によって精度よく推定するための水質観測回数、観測日（たとえば低流量時と出水時の組み合わせ方）および推定式（あるいは推定モデル）を明らかにする。なお、筆者らはこれを実用上重要な課題と考え、検討を進めている<sup>19)</sup>。

④ 表-3 に示したような流域の諸条件と水質項目ごとの流出特性の関係を、複数流域における比較分析などにより明らかにし、支配要因をいくつかにしほることにより、現象の理解と把握を簡潔かつ正確にできるようとする。

**謝 辞：**本研究を進めるにあたっては、建設省河川計画課、近畿地建淀川・猪名川工事事務所、関東地建霞ヶ浦工事事務所の方々に資料を提供していただいた。また、調査を進めるうえで土木研究所水質研究室の村上室長・大島研究員、都市河川研究室 浅野研究員、東京工業大学 吉川教授（現在 早稲田大学教授）・日野教授からご指導と助言を得た。さらに総合治水研究室の中島技官には計算等の面で協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 吉川秀夫：浮遊流砂量に関する二、三の考察、土木研究所報告、第 83 号、1952.
- 2) Guy, H.P. : An Analysis of Some Storm-Period Variables Affecting Stream Sediment Transport, U.S. Geological Survey Professional Paper, 462-E, 1964.

- 3) 須賀堯三：浮遊流砂に関する雑考，土木学会第 25 回年講概要集，1970。
- 4) Gunnerson, C.G. : Streamflow and Quality in the Columbia River Basin, ASCE, Vol. 93, No. SA 6, 1967.
- 5) 羽田守夫：雄物川の水質特性とその変化，土木学会論文報告集，第 269 号，1976。
- 6) 山口高志・吉川勝秀：河川の水質・汚濁負荷量に関する研究（I）—汚濁流出特性への水文学的アプローチ，土木研究所報告，第 151 号，1978。
- 7) 建設省近畿地方建設局淀川工事事務所：降雨時の河川水質の挙動について，1974。
- 8) U.S. Environmental Protection Agency : Storm Water Management Model, EPA Water Quality Office, 1971.
- 9) Sartor, J.D. and G.B. Boyd : Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-R 2-72-081, 1972.
- 10) 稲揚紀久雄：雨天時下水の水量水質制御に関する研究，京都大学博士論文，1975。
- 11) 高畠征三郎・神山桂一：合流式下水道における雨天時流出汚濁負荷量の推定，第 12 回衛生工学研究討論会論文集，1976。
- 12) 山口高志：雨天時合流式下水道からの汚濁流出シミュレーション，土木技術資料，Vol. 18, No. 2, 1976.
- 13) 本間 仁・石原藤次郎編：応用水理学 下 II (数値解析、水文観測)，丸善 K.K., 1971.
- 14) Hall, F.R. : Dissolved Solid-Discharge Relationship, 1. Mixing Models, Water Resources Research, Vol. 6, No. 3, 1970.
- 15) Walling, D.E. : Assessing the Accuracy of Suspended Sediment Rating Curves for a Small Basin, Water Resources Research, Vol. 13, No. 3, 1977.
- 16) Hetling, L.J. and R.M. Sykes : Sources of Nutrients in Canadarago Lake, Journal, Water Pollution Control Federation, Vol. 45, No. 1, 1973.
- 17) Campbell, F.B. and H.A. Bauder : A Rating Curve Method for Determining Silt-Discharge of Streams, Trans. American Geophysical Union, Report and Papers, Hydrology, 1940.
- 18) O'Conner, D.J. : The Concentration of Dissolved Solids and River Flow, Water Resources Research, Vol. 12, No. 2, 1976.
- 19) 山口高志・吉川勝秀：河川の水質・汚濁負荷量に関する研究（II），土木研究所報告（投稿中），1979。
- 20) Loehr, R.C. : Characteristics and Comparative Magnitude of Non-point Sources, Journal, Water Pollution Control Federation, Vol. 46, No. 8, 1974.
- 21) 佐藤清一・吉川秀夫・芦田和男：河川土砂流送に関する研究，土木研究所報告，No. 101, 1959.
- 22) 建設省河川局河川計画課：河川水質変動の一般的特徴について（要約），1978。
- 23) 宮永洋一・他 3 名：貯水池流入河川における水温・濁度の現地観測。
- 24) Rutherford, J.C. and M.J. O'Sullivan : Simulation of Water Quality in Tarawera River, ASCE, Vol. 100, No. EE 2, 1974.
- 25) 市川 新：水質ハイドログラフに関する研究，第 19 回水理講演会論文集，1975。
- 26) Ledbetter, J.O. and E.F. Cloya : Predictive Techniques for Water Quality Inorganic, ASCE, Vol. 90, No. SA 1, 1964.
- 27) Gupta, S.K. and S.I. Solomon : Distributed Numerical Model for Estimating Runoff and Sediment Discharge of Ungaged River, 3. Comparison with Other Simple Techniques, Water Resources Research, Vol. 13, No. 3, 1977.
- 28) 綾 史朗・他 2 名：濁質の流送過程について，第 22 回水理講演会論文集，1978。
- 29) Drake, J.J. and D.C. Ford : Hydrochemistry of the Athabasca and North Saskatchewan Rivers in the Rocky Mountains of Canada, Water Resources Research, Vol. 10, No. 6, 1974.
- 30) Cahill, T.H. et al. : Evaluation of Phosphorus Dynamics in a Watershed, ASCE, Vol. 100, No. EE 2, 1974.
- 31) Cordery, I. : Quality Characteristics of Urban Storm Water in Sydney, Australia, Water Resources Research, Vol. 13, No. 1, 1977.
- 32) Crawford, N.H. and Jr.S. Donigian : Pesticide Transport and Runoff Model for Agricultural Lands, Report No. EDA-660/2-74-013, U.S. Environmental Protection Agency, 1973.
- 33) Shannon, E.E. and P.L. Brezonik : Eutrophication Analysis, A Multivariate Approach, ASCE, Vol. 98, No. SA 1, 1972.
- 34) Gburek, W.J. and W.R. Heald : Soluble Phosphate Output of an Agricultural Watershed in Pennsylvania, Water Resources Research, Vol. 10, No. 1, 1974.
- 35) Bailey, R.R., et al. : Predicting Pesticide Runoff from Agricultural Land, A Conceptual Model, Journal of the Environmental Quality, Vol. 3, No. 2, 1974.
- 36) Thomas, G.W. and J.D. Crutchfield : Nitrate-Nitrogen and Phosphorus Contents of Streams Draining Small Agricultural Watershed in Kentucky, Journal of the Environmental Quality, Vol. 3, No. 1, 1974.
- 37) Coughlin, R.E. and T.R. Hammer : Stream Quality Preservation through Planned Urban Development, Report No. EPA-A 5-73-019, U.S. Environmental Protection Agency, 1973.
- 38) 洞沢 勇：河川上流における自然汚濁量と比流量の関係について，用水と廃水，Vol. 15, No. 11, 1973.
- 39) 和田安彦：河川上流部の自然負荷量の定量化とその特性，用水と廃水，Vol. 20, No. 4, 1978.
- 40) 和田義和・橘 治国：汚濁河川における有機物の挙動についての研究，第 9～12 回衛生工学研究討論会講演論文集，1973～76。
- 41) 橘 治国・那須義和：河川における汚濁物質の流出機構，11 第回水質汚濁研究に関するシンポジウム講演集，1977.
- 42) Pisano, M.A. : Non-point Sources of Pollution, A Federal Perspective, ASCE, Vol. 102, No. EE 3, 1976.
- 43) 吉良八郎：貯水池の堆砂問題について，土木学会論文報告集，No. 193, 1971.
- 44) 江崎一博：貯水池の堆砂予測に関する研究，土木学会論文報告集，No. 262, 1977.
- 45) 栗谷陽一：河川汚濁論，水工に関する夏期研修会講義集（B. 河川コース），1968.
- 46) 高村義親・田淵俊雄：水田肥料の流出と陸水の富栄養化，河川水質年鑑，1977.

(1979.1.19・受付)