

水資源計画における水循環モデル分析

日本水道コンサルタント 正員 萩 原 良 巳

日本水道コンサルタント 正員 〇 蔵 重 俊 夫

日本水道コンサルタント 正員 渡 辺 晴 彦

1. はじめに

水資源計画における重要な課題の1つに資源の保全があげられる。これは、資源地としての河川・湖沼などの水環境に対し、その水量水質の将来的な安定性を確保することであるといえよう。すなわち、地域活動を行うことと、それが水環境に与えるインパクトとの調和をはかっていくことが、その骨子であると考えられる。このために必要となるのは、まず、どのような地域活動が行なわれたとき、いかなるインパクトを生ずるかという関連を把握し、両者の対応に関する領域を求め、次いで、好ましい地域活動はどれかを評価するという分析である¹⁾。このとき、地域活動とそのインパクトの対応において、重要な要因となるのが、水循環機構であり、そのメカニズムを把握したうえで先の領域を解釈することが必要であると考えられる。

1つの流域を対象とする場合、水循環機構は、大きくは、河川を中心としたカスケード形の水のやりとりから、個々の支流域内での農水と上水の関連、また小さくは、1つの工場の中での回収水利用などがあげられる。しかし、始めに述べた河川を媒介としたカスケード形の水循環が、河川環境へのインパクトを考える場合に、支配的な要因であろう。このため、流域本川にインパクトを与える支流域が、どのような地域活動を背景に、どれだけの影響を与えているかを検討することがまず必要になり、それを総合してとらえたときに、流域全体としての地域活動と水環境インパクトの関連をみることができる。

水環境インパクトとして汚濁負荷量を取りあげたとき一般に、負荷の流出特性に影響を与えるのは、降雨・地形などの自然的要因と水利用・土地利用などの人為的要因である。つまり、どれだけの負荷が出るかという量的要因としての降雨・利水量と、どのように出るかという質的要因としての地形・土地利用形態がある²⁾。本稿では、このうち、後者の質的要因と負荷流出特性の関連に焦点をあてた分析を行い、地域活動と水環境インパクトの関連把握の基礎情報を得ることとする。具体的には、河川を媒介とするカスケード形の水利用を行う流域に対し、支流域を単位とした負荷流出特性とそれに影響を与える要因の把握を試みる。ここで、支流域単位の分析を行うのは、一般に言われる農地・山地・市街地での負荷流出形態の違いに対し、それを一体としてとりあつかい、土地利用形態との対応を検討することにより、支流域全体の土地利用計画との関連をみるという意図による。また、流出特性をみる時間スケールとしては、季節もしくは月オーダーでとらえる。これは水環境の保全という目的に対し、年オーダーの計画をすすめるためには、1年のうちのどの時期が最も流出負荷の大きいときかという検討を行う必要があるという理由による。

以下では、まず、2はおいて、本稿で対象としたY川流域の概要に触れ、支流域ごとの負荷流出特性をパターン化してとらえ、パターンの違いを記述する要因について検討する。さらに、ここで季節オーダーの負荷流出に対し、貯留にもとづく非線形効果が大きく関与するという結果を得たことから、3では、その点を考慮したときの負荷流出モデルを提案し、準線形化手法を用いてモデル定数の決定を行う。このモデル定数は、負荷流出特性を示す指標の1つであると考えられるためさらに、それを用いて、支流域のパターン化を行い、そのパターンの違いについて考察する。

2. 負荷流出特性に関するパターン分析

2-1 Y川流域の負荷流出特性

本稿で対象とするY川流域は、流域面積650km²で人口約65万を抱えるが、下水道整備は、殆んど進んでいない。図-1に流域のモデル図を示す。これからわかるように、当該流域は、5つの支流域で構成されて

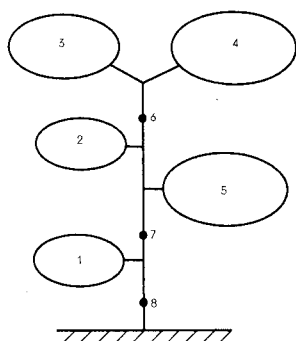


図-1 流域モデル図

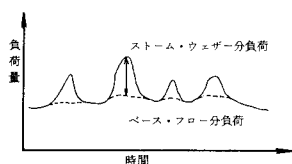


図-2 ベース・フロー分負荷概念図

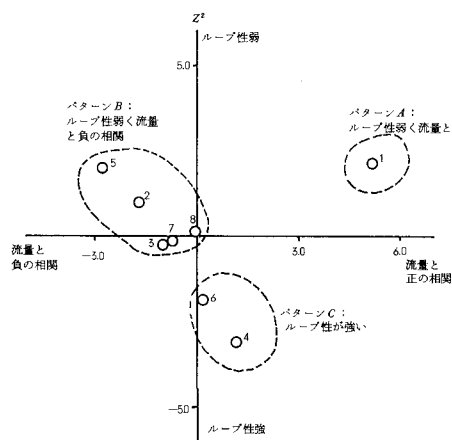


図-3 負荷流出特性による支流のパターン化

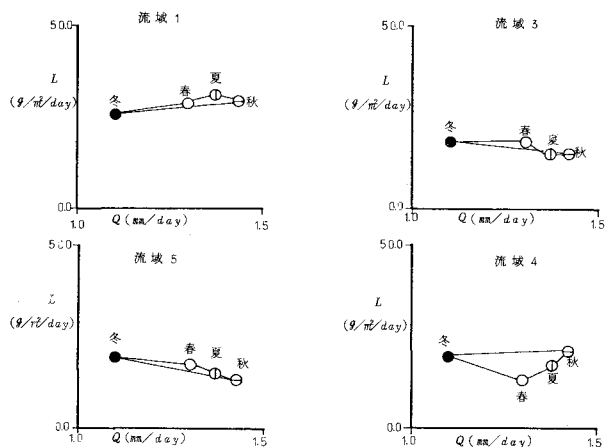


図-4 L-Q 曲線

線（レイティングカーブ）を図-4に示す。

パターンA：LとQが正の相関をもつ（流域1）

パターンB：LとQが負の相関をもつ（流域2, 3, 5, 7, 8）

パターンC：L-Q曲線にループ性を有す（流域4, 6）

このようなL-Qの対応の違いは、一般に負荷が流域に貯留され、流量の季節変動に対し非線形な時間おくれを有することに帰因すると考えられている。各パターンの物理的な特徴については、表-1にまとめて示す。

具体的に、Y川流域の各パターンについて解釈すれば次のように考えられる。

(1) パターンA：（図-4(a)参照）

これに属する流域は、L-Q曲線のループ性は弱く、夏から秋にかけての流量の多い時期に負荷の流出が多くなっている。

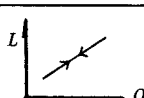
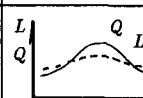
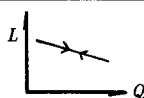
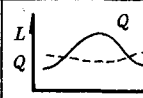
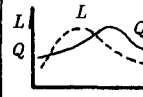
(2) パターンB：（図-4(b)(c)参照）

これに属する流域は、流量の多い夏秋に比べ、逆に少い冬に負荷が多く流出しており、 $L-Q$ 曲線のループ性は顕著にあらわれない。これは、冬から春にかけて、流域に貯留されているとみられる負荷が大部分流出し、夏から秋には、流出が抑えられていると考えられる。

(3) パターン C : (図-4 (d)参照)

これに属する流域は、ループ性が顕著にあらわれる。すなわち、秋から冬にかけて大量の負荷が流出してしまい、流量が増加する春には流出が極端に減少する。しかし、流域内の貯留はその後すすみ、夏から秋の流量増加の時期に負荷流出があらわれると考えられる。

表1 負荷流出特性のパターン

パターン	$L-Q$ カープ特性	ポルト・グラフ特性	特徴	負荷の貯留効果
(A) 正相関型			流量増に伴い、負荷量も増大	小さい
(B) 負相関型			流量増にかかわらず負荷量低減	大きい
(C) ループ型			流量と負荷量のピークのずれ有	大きい

2-2. パターンの違いに関連する要因分析⁴⁾

ここでは、Y川流域において得られた3つの負荷流出パターンに対し、その違いを説明する要因の抽出を行い、支流域の地域特性からみたパターンの解釈を行う。

一般的に、負荷の貯留に影響を及ぼす要因としてあげられるのは、次のようなものである。

- (1) 河川における貯留効果 …………… 河川長・支川数など
- (2) 流域表面における貯留効果 …… 農地面積・ため池数、市街地面積など
- (3) 地下における貯留効果 …………… 勾配・地質など

表-2(1) 判別関数

パターン	関数値	支川数 x_1 (本/ka)	河川長 x_2 (km/ka)	農地面積 x_3 (%)	ため池個数 x_4 (個/ka)	定数
A	$f_A =$	$40.0x_1$	$-14.4x_2$	$+428x_3$	$+4.5x_4$	-812.9
B	$f_B =$	$37.4x_1$	$-26.9x_2$	$+70.1x_3$	$+5.6x_4$	-1230.4
C	$f_C =$	$33.7x_1$	$-28.3x_2$	$+72.2x_3$	$+5.5x_4$	-1190.3

表-2(2) 判別関数の検証

パターン	流域	最大判別関数値	判別率	判別結果
A	1	812.9	1.00	A
	2	1253.9	0.99	B
	3	1233.3	0.99	B
B	5	1296.1	0.99	B
	7	1222.4	0.76	B
	8	1146.3	0.99	B
C	4	1182.0	0.99	C
	6	1198.5	0.94	C

このため、本稿では、このうちのいくつかの要因を支流域ごと集計し、パターンの違いを外的基準とした判別分析を行った。この結果、表-2に示すような形で、支川数・河川長・農地面積・ため池数などが、貯留に関わる要因となることがわかった。この4つの要因についてパターンごとに、値の違いをみたのが、図-5である。この図から、パターンAと他を区別する要因としては、支川数と農地面積比率が大きく関連することがわかる。すなわち、支川数が多くなると、貯留効果が少くなり、農地が多いと逆に貯留効果が大きくなる傾向にある。これは、支川数が、支流域の負荷が河川に流出するしやすさを示し、農地面積比率は、貯留する場が増えることを意味していると考えられる。また、他の

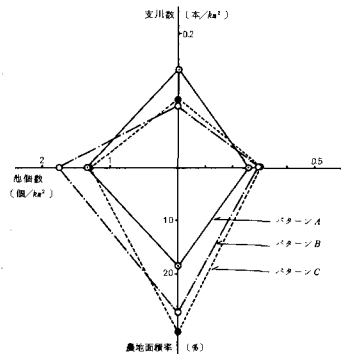
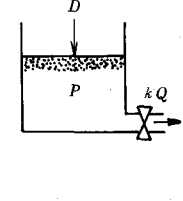


図-5 負荷流出パターンの影響要因

要因については、河川長が、農地面積比率と同じく、多くなれば貯留効果を増す傾向にあると言える。一方、ため池個数は、パターンBと他を区別する要因であり、ため池が増えれば貯留効果が大きくなることを示唆している。

それぞれの要因だけでは、単純に判別できないが、4つを合成した判別関数を用いれば、表-2のように、精度よく判別することができる。

表-3 負荷流出モデル

モデル概念図	定式化
	連続の式
	① $P = D - L$
	運動の式
	② $L = k P Q$
記号	D : 発生負荷量 ($g/m^2/s$) P : 貯留負荷量 ($g/m^2/s$) L : 流出負荷量 ($g/m^2/s$) Q : 流量 (m^3/s) k : 定数 ($1/m$)

3. 貯留を考慮した負荷流出モデル分析

3-1 一次反応系のモデルとパラメータ同定

これまでの分析から、季節・月オーダーの負荷流出については、負荷の貯留を考慮しなくてはならないことが判った。さらに、従来、負荷と流量は別個にその変化をモデル化していたのに対し、両者の関連を流域ごとに検討する必要があると言えよう。このような経緯に対し、本稿では、貯留を考慮した負荷流出モデルを検討した。この場合のモデルは、水環境計画で要求する情報を得るものであるため、できるだけ単純な形とし、操作性に富むことが要求される。このことから、流域貯留量を仮定したその1次反応形のモデルをとりあげた。モデルの概要は、表-3にまとめて示す。

このモデルにおいては、次のような仮定をもたせている。まず、月々の発生負荷量 (D) は、貯留負荷量 (P) に比べてその変化が少いとみなし、年間一定とした。また、貯留負荷が河川にどれだけ流出するかを示す流達率 (k) も、年間一定とした。さらに、貯留負荷を流出させる流達力とみられる降雨や利水量については、そのうち河川に流出するものだけを有効分としてとらえ、支流流域流量で代替させた。以上のことから、 k と D のパラメータ推定を (L , Q) の時系列データをもとに行う必要がある。この際、本稿では、パラメータの自動決定化を行うことのできる準線形化手法^{5) 6)}を用いた。同手法の概略を図-6に示す。

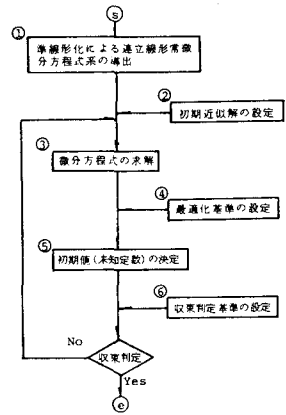


図-6 準線形化を用いた定数決定フロー

さて、準線形化手法により、8つの支流流域についてパラメータ推定を行った結果、6つの支流流域で値が収束した。その結果を図-7に示す。また、図-8には支流流域3について準線形化によるボルト・グラフの推定結果を示す。図-7から明らかなように、負荷流出パターンに関し、同じパターン内では、ほぼ類似の値をとることがわかった。このため、収束の得られなかった支流流域7, 8については、パターンBと同じ値をとることが推測される。一方、パターン間の差異についてみれば、パターンAとパターンBの差は、流達率 k の違いであり、パターンCと他との違いは、流達率 k と発生負荷量 D の双方が、他より大きいということがわかる。

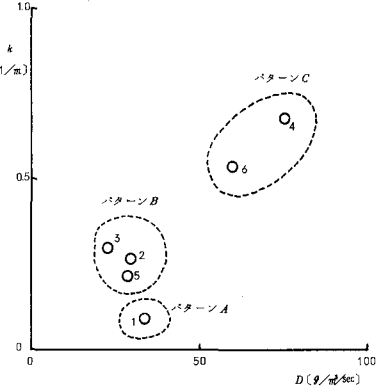


図-7 パラメータ推定結果

このパラメータ推定の結果からみて、Y川流出特性の違いとして重視する必要があるのは、パターンCとそれ以外の差異であると言えよう。すなわち、 $L-Q$ 曲線に関し、ループ性があるかどうかに関連する要因は何かという検討が必要であると考えられる。

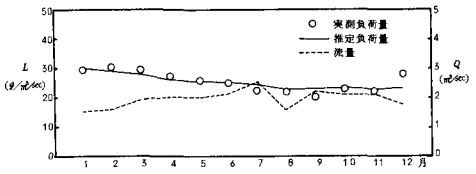


図-8 準線形化による流出負荷量推定結果 (流域3)

3-2. ループ性の有無に関する影響要因分析⁷⁾

まず、パラメータ k と D の物理的な解釈を行っておく。流達率 k とは、貯留された負荷に対し、流量が同じであればそれが大きいほど負荷が出やすいということを示している。この負荷の出やすさは、一般に支流地域の勾配がきつくなるほど、また、支川数など支流域と河川の結合が強いほど大きくなると考えられる。一方、発生負荷量 D は、これが大きいほど貯留される負荷も大きいことになり、負荷発生の原単位の大きい地域活動で占められるものと考えられる。一般には、工場や農業による発生負荷量が多いという報告がされている。⁸⁾

以上のことから、本稿では、農地面積・森林面積・工場面積・支川数・商業面積・人口密度などの支流域ごとの地域特性により、ループ性の有無（パターン C とそれ以外）の判別分析を行った。この結果、表-4に示すようにループ性をもつ場合は、森林面積・工場面積が多く、ループ性のない場合は、農地面積が多いという傾向にあることがわかった。このことは、森林面積の多さは、支流域の山地部の多さを示し、土地勾配がより大きいことにつながって k を大きくし、工場面積の多さは、工場による汚濁が強いことから D を大きくすることに関連するものと推測される。

表-4(1) 判別関数

パターン	関数値	農地面積 x_1 (ha/km^2)	森林面積 x_2 (ha/km^2)	工場敷地面積 x_3 (ha/km^2)	定数
AB	$f_{AB} =$	$1.31 x_1$	$+ 1.23 x_2$	$+ 57.25 x_3$	$- 79.76$
C	$f_C =$	$1.13 x_1$	$+ 1.58 x_2$	$+ 6.782 x_3$	$- 116.31$

表-4(2) 判別関数の検証

パターン	流域	最大判別関数値	判別率	判別結果
AB	1	85.95	0.89	AB
	2	71.76	1.00	AB
	3	62.41	1.00	AB
	5	81.74	0.95	AB
	7	88.49	0.84	AB
	8	88.21	0.85	AB
C	4	133.35	1.00	C
	6	99.27	0.67	C

4. おわりに

本稿では、水環境の保全という目的をもった計画において、まず、地域活動と環境インパクトの対応関係を分析することが肝要であるという観点から、従来の年オーダーの量的な対応での分析に対し、季節・月オーダーでの負荷流出特性を質的な側面から検討した。これは、Y川流域を対象に、支流域レベルでの負荷流出特性の違いに対し、地形や土地利用といった月オーダーでは一定とみられる要因の違いが大きく影響するという考え方にもとづいている。具体的には、支流域の負荷流出特性を $L-Q$ 曲線に表われる負荷貯留効果により3つのパターンに分け、その違いが、支川数や農地面積の違いであることを把握した。さらに、その具体的な違いについて、1次反応形の負荷流出モデルをとりあげ、準線形化手法によるパラメータ推定結果から、パターン内のパラメータは、ほぼ類似の値をとることがわかった。従って、今後、データを整備していくことにより、パターンの判別によりモデル定数を逆に推定することも可能になると考えられる。また、モデル定数の違いがどのような要因にもとづくのかという分析については、定性的な判別分析から解釈を行い、 $L-Q$ 曲線のループ性の有無は、森林面積・工場面積などにより説明された。

以上のような分析から、本稿の狙いである負荷流出特性と支流域の地域特性との関連について、定性的ながらも把握を行うことができたと考えられる。今後の課題としては、次のような点があげられよう。

- (1) 支流域データの整備により、モデル定数と地域特性の定量的関連分析を行い、たとえば、年オーダーの土地利用計画が負荷流出にどれだけ影響するかを把握できるモデルの作成
- (2) 本稿では、流量で代替した利水量のモデル導入および取排水ネットワークなど、人為的な支流域間の結合が、どのように負荷流出に係わるかについての検討

最後に、本稿のとりまとめにあたり、御助言をいただいた日本水道コンサルタント システム開発室の諸兄に感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 萩原良巳・渡辺晴彦；水配分の適正化に関するモデル分析、土木学会 第3回土木計画学研究発表会講演集、pp. 215～220, 1981
- 2) 萩原良巳・中川芳一；地域における水環境計画のための流達負荷量の構造分析法に関する研究、土木学会第4回環境問題シンポジウム講演論文集、pp. 87～92, 1976
- 3) 山口高志、吉川勝秀、奥石 洋；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、pp. 49～63, 1980
- 4) 萩原良巳・渡辺晴彦・今田俊彦；都市の水利用システムに関するパターン分析、NSC研究年報 Vol. 9, No. 1, pp. 131～140, 1981
- 5) Hagihara, Y., Nakagawa, Y. and T. Kurashige ; *A Basin Water Cycles System and Identification, Water Resources Systems Analysis and Planning, Vol. 9, No. 1, pp. 49～64, 1981*
- 6) 森野彰夫・中川芳一・蔵重俊夫；流域の土地利用形態を考慮した洪水流出解析(1)、土木学会第25回水理講演会論文集、pp. 243～248, 1981
- 7) 羽田守夫；雄物川の水質の変動特性とそのモデル化、土木学会論文報告集、第265号、pp. 73～81, 1977
- 8) 例えば 日本水道協会；流域別下水道整備総合計画調査指針と解説、1980