

(6) 河川管理計画における汚濁流達率の研究

関西大学工学部 和田 安彦

1. 結 論

公共用水域に流出する汚濁負荷は、汚濁物の流出過程によって変化するため、公共用水域の河川監理においては、汚濁物の流出の状況を表す汚濁流達率の検討が重要な位置をしめてくる。汚濁流達率の研究の必要性には次のものがあげられる。

- 1) 雨水流出量のように、わかりやすく汚濁の流出量を表す必要がある。
- 2) 汚濁物の流出の状況をわかりやすく表す方法は他に現在みあたらない。
- 3) 公共用水域水質保全計画の最重要因子であり、この特性を明らかにしておく必要がある。
- 4) 比較的、メッシュ的な取り扱い、河川流出、支配因子の究明に用いやすい。

この研究の目的は汚濁流達率の支配因子とその特性の究明にある。

2. 汚濁流達率の意味と従来の研究¹⁾

2-1 汚濁流達率

(1) 汚濁流達率の定義

汚濁物が発生し種々な流下経路をたどって河川に流入するまでの汚濁物の流出の割合を汚濁流出率と呼び、河川に流入してから下流に流下するときの総合的な自浄能力を減衰率と定義する。汚濁流出率と減衰率を総合したものを汚濁流達率と定義する(図-1)。

市街地で発生した負荷量を $\bar{L}(t)$ 、汚濁流出率を C_r とすると、汚濁流達率 R は

$$R = \frac{\int L(t) dt}{\int \bar{L}(t) dt} \quad (1)$$

で定義される。

ここで、 $L(t)$ は河川のある地点での単位時間の流下負荷量である。河川に流入する負荷量 $L'(t)$ は

$$L'(t) = \bar{L}(t) \cdot C_r \quad (2)$$

で表され、下流点に流達する負荷量 $L(t)$ は、河川での汚濁減衰率を $\alpha(t)$ とすると

$$L(t) = \{ L'(t) + L_0(t) \} \alpha(t) \quad (3)$$

で求められ、式-2, 3を式-1に代入して、ある時間 $t_1 \sim t_2$ での汚濁流達率 R は

$$R = \frac{C_r \cdot \int_{t_1}^{t_2} \bar{L}(t) \cdot \alpha(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} L_0(t) \cdot \alpha(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} \bar{L}(t) dt} = \frac{C_r \cdot \int_{t_1}^{t_2} \bar{L}(t) \alpha(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} \bar{L}(t) dt} + \frac{\int_{t_1}^{t_2} L_0(t) \alpha(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} \bar{L}(t) dt} \quad (4)$$

で求められる。

今、流れが余り変化しない河川においては、沈殿、堆積の時間変化は小さいと考えられ、さらに、生物作用は河川全体の減衰率からみると小さいことから、大きなショックロードを受けない定常的な河川においては、 $\alpha(t)$ は一定値 α とみなしうる。すると、式-4は式-5となる。

$$R = C_r \cdot \alpha + \frac{\int_{t_1}^{t_2} L_0(t) \alpha dt}{\int_{t_1}^{t_2} \bar{L}(t) dt} \quad (5)$$

ここで、 $L_0(t)$ は対象河川の汚濁負荷量が流入する上流地点の流下負荷量である。

河川上流に人為的汚濁がない場合には、汚濁負荷は自然流出による負荷のみであり、この負荷量は

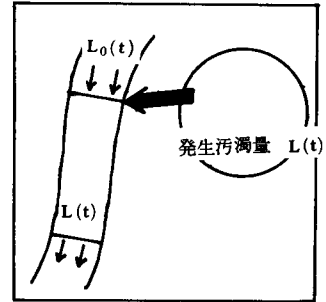


図-1 汚濁流達率の概念図

中小河川においては、ほとんど無視できる程度のものであり、 $L_0(t) \approx 0$ とおける。したがって、式-5は

$$R = C_r \cdot \alpha \quad (5)'$$

となる。一方、 $\alpha(t)$ は式-3より

$$\alpha(t) = \frac{L(t)}{L'(t - \delta) + L_0(t - \delta)} \quad (6)$$

で求められる。ここで、 δ は負荷が流入してからの流下時間である。

$t_1 \sim t_2$ 間の河川の平均的な減衰率 α は、

$$\alpha = \frac{\int_{t_1}^{t_2} L(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} \{L'(t - \delta) + L_0(t - \delta)\} dt} \quad (7)$$

で求められる。式-6から、 $\alpha(t)$ は次のようにかける。

$$\alpha(t) = \frac{L(t) / \bar{L}(t)}{C_r(t) + L_0(t) / \bar{L}(t)} \quad (8)$$

すなわち、河川の減衰率は、発生した負荷量が河川に流達する汚濁流達率に比例し、汚濁流出率と対象流域の上流に流入する負荷量の対象地域内で排出された負荷量の割合との和に反比例する。

(2) 汚濁流達率の意味

以上の関係から、中小河川においては、汚濁流達率は汚濁物が河川に流入するまでの汚濁流出率と、河川に流入してからの減衰率の積として表現できる。従って、 R は C_r と α の値の大小によって大きく変わる。

C_r は、汚濁物が排出されて河川に流出するまでの状況を表すものであり、地域特性に影響される。その要素としては、雨水流出係数、水路のパターン、水路の整備状況、周辺の緑地量、排水路などの汚濁物の堆積量、さらに、ある地域の排水の状況を過去から積分した地域の履歴にも関係する。

一方、 α は河川の流下特性によって変わるものであり、河川内部でひきおこされる沈殿、まき上げ、地中浸透、吸着、希釈などの物理作用、さらに生物化学的作用などに支配される。簡単に定量し難い種々の要因によって構成されている。

しかし、実用上は、各種の研究の進行と合わせて、操作可能な因子で表現してゆく必要がある。その一つとして、生物作用、物理作用、化学作用の中で最も大きな支配力をもつ因子は流量である。

2-2 従来の研究

汚濁流達率に関する研究は、その目的と用途の上から次の4つに分類できる。

1) メッシュ解析への適用

河川の汚濁解析や、水質保全計画に用いられ松本ら²⁾は阿武隈川の流域5,420km²、流路長1,400kmを68×36のメッシュに分け、8カ所の地点で実測汚濁負荷量と比較し次の結果を得ている。

- ① 細かくメッシュに分割してもそれに対応する実測資料がなく、メッシュに分割した効果が生かされない。
- ② 農業による負荷発生、流出、取水などによる負荷流出収支、せきによる沈殿効果、出水時のフラッシュ作用をパラメータ化し導入する必要がある。

住友ら³⁾は京都市内を500mメッシュに分割し、汚濁流達率を各メッシュごとに設定し、下流点での実測負荷量と比較し、汚濁流達率を各メッシュごとに修正している。得られた結果は次のものである。

- ① 各メッシュを同じ汚濁流達率とするには無理があり、各メッシュごとに汚濁流出特性を評価することが重要である。
- ② 汚濁流達率は単位面積当りのBOD発生負荷量が大きくなれば、大きくなる。

③ 流域特性の指標として、(雨水流出率×地面勾配/流路長)をとっているが、汚濁流達率と明確な関係を示し得ない。

2) 河川と汚濁流出特性の解明

村上⁴⁾は、わが国の14の都市河川を対象にBODを中心に、汚濁流出率と人口密度、流域面積との関係を調べ、汚濁流出率Rは(√流域面積/人口密度)との関係が大きく、その関係を式-9で表した。

$$R = 100 e^{-C \frac{\sqrt{A}}{P}} \quad (9)$$

ここで、Aは流域面積(ha)、Pは人口密度(人/ha)、Cは比例定数である。この式から、人口の集積が大きいほど、地域の大きさが小さいほど汚濁物の流出の割合は高まることがわかる。問題点として次の点をあげている。

①BODなどの原単位を実情に合せる。②汚濁流出率を $\frac{A^n}{(P)^m}$ で近似する。③汚濁物の沈殿、浸透を考慮する。④雨水流出係数を支配因子として導入する。

しかし、汚濁流出率を $\frac{A^n}{(P)^m}$ で表すには、沈殿、雨水流出系を表現できないからこの方法は限界があり、他に諸要素を導入する必要がある。

汚濁流出率を実用化するものとして、稲場ら⁵⁾は五大都市の排水路、人口のほぼ似た地区を選定してユニット排水区を設け、汚濁流出率を求めている。BODでは0.17~0.63、CODでは0.32~1.09、SSでは0.15~0.93、T-N0.26~1.45、T-P0.085~5.34と大きな変化を示している。自然部分の多い地域と人工的な部分の多い地域では異なり、二面コンクリートばりの排水路整備地域では、BOD、SSの汚濁流出率はともに0.5~0.7にあり、市街地住宅地の雨水流出係数に近い値である。

3) 河川の汚濁解析

河川の汚濁解析に用いたものは数少なく、那須ら⁶⁾は河川の有機物の流出挙動から汚濁流出率、流達率にアプローチしようとしているが、その結果はまだ明確ではない。

4) 計画因子の究明

河川管理計画に用いるためには、汚濁流出率、流達率に最も大きな影響を与える支配因子の究明が重要である。1),2)で得られた成果も計画因子の一つになってくるがそれらをまとめて議論したものはない。和田ら⁷⁾は中小河川の汚濁流達率の時間変化を求めることによって、汚濁流達率の特性を解析しており、次のような結果が得られた。

① 汚濁流達率は時間的に変動し、1以下で堆積作用が大きく、地域内の汚濁抑制力が大きくはたっている。

② BOD、SSによる汚濁流達率は、流量の関数となり、中小河川では排水量にも影響される。

③ 中小河川においては、汚濁流達率は流量のべき乗に比例し、一般にべき数は2と表しうる。

④ 汚濁流達率は地形、勾配と一次関係にある。

⑤ 汚濁流達率は人口の集積が大きいほど、地域の大きさが小さいほど大きくなり、汚濁の発生量、発生密度の大きいほど高くなる。

3. 自然地域の汚濁流達率

ここでは自然地域における汚濁流達率を比流量との関係について検討する。調査対象は神戸市北区のうち、都市河川水系にある鈴蘭台地区および武庫川本流水系を除いた地域で、市面積の約35% (180.1km²)を占め、その7割程度が森林におおわれている山間丘陵地帯である。解析にあたってはかんがい期と非かんがい期に分けて検討している。¹⁾

(1) 比流量と汚濁流達率

緑地の効果は汚濁物の流出に間接的に影響を与えているが、定量的にはまだ明らかにされていない。しかし緑地があると、保水力が増し比流量が増大することが知られ、流域が大きく、緑地量が多くなると河川流量は安定してくる。緑地は比流量とはある関係をもっている。緑地を汚濁流出に何らかの方法で評価するため、比流量と汚濁流達率の関係を検討する。

比流量は単位面積当たりの河川流量を表わしたもので、ある地域の河川流量に与える保水力を総合的に示す指標の一つである。したがって、比流量が大きいことは、河川流量が大きいことを示している。流量 Q は、比流量を Q_0 とすると流域面積を S とし

$$Q = S Q_0 \quad (10)$$

で表わされる。

一方、中小河川の汚濁流達率 R は、和田ら⁷⁾⁸⁾の研究によって、

$$R = K Q^n \quad (11)$$

と表わされる。 K 、 n は地域の特性と、水質項目によって異なる定数である。

比流量は、対象面積と式-12の関係にあるとする。

$$Q_0 = K_1 S^m \quad (12)$$

式-10、式-12から S を消去し、面積に関係ない関係を求めると

$$Q = (Q_0^{m+1} / K_1)^{1/m} \quad (13)$$

ただし、 $m \neq 0$ 、式-13を式-11に代入すると

$$R = K (Q_0^{m+1} / K_1)^{n/m} \quad (14)$$

を得、BODについては $n \approx 1$ と表わせるから、式-13は

$$R = (K / K_1^{1/m}) (Q_0^{1+(1/m)}) \quad (15)$$

と表わせる。

$m < 1$ においては、 Q_0 は S の小さいところで影響するが、 m が 0 に近いところでは、式-12より、

$$Q_0 = K_1 \quad (16)$$

式-15より

$$R = K \cdot K_1 \quad (17)$$

と一定値となり、汚濁流達率は面積に関係しなくなる。比流量が面積にかかわらず一定な流域では、汚濁流達率は変化なく、一定の値をとることがわかる。

$m \geq 2$ においては、 m が十分に大きい値をとると、

$$dQ_0 / dS \quad (18)$$

も高次関数となり、式-15より、

$$R = K Q_0 \quad (19)$$

と表わせ、汚濁流達率は比流量と1次関係を示す。すなわち、比流量が増大することによって汚濁流達率が大きくなることがわかる。

$m \geq 1$ においては、 $1 < 1 + 1/m \leq 2$ (20)

の関係より、式-15は、式-12が一次近似できる場合には、

$$R = K Q_0^2 \quad (21)$$

と表わせ、式-12が高次近似式の場合には、

$$R = K Q_0^{1+(1/m)} \quad (22)$$

ただし、

$$K = K / K_1^{1/m}$$

となり、汚濁流達率は、比流量の2乗以下の関数で表されることがわかる。流量よりも1次高い関数として表される。

今、 K は十分小さい値をとる場合においては、式-21, 22は直線近似できる。図-2, -3はこの関係をプロットしたもので、直線近似しうることを示している。なお、ここで用いた比流量は年間平均水量をもとにして算出したものである。

(2) 比流量と支川延長

ある水系流域の中で、支川の長さの合計は、流域内での水の流入の大小を示している。水の流入の多いことは、流域の汚濁物の流出にも間接的に影響を与えている。ある流域内での支川延長を流域面積で除した単位面積当たりの支川延長は比流量と何らかの関係をもっている。

図-4に、比流量と単位流域面積当たりの支川延長との関係を示す。特殊な有馬川の値を除いては、支川延長が増大することによって比流量が大きくなっていることがわかる。かんがい期、非かんがい期ともにその関係は、図から一次直線に回帰しうる。

田畑への取水量の少ない非かんがい期は、比流量と支川延長の関係はより顕著である。

図5に比流量と単位農地面積当たりの支川延長との関係を示す。有馬川を除いては、両者には一次関係がみられる。今、支川延長を l とするとその関係は、

$$l/S = K_2 Q_0 \quad (23)$$

支川延長が大きいことは、農地への水の需要が多く、水の供給形態の整っていることを表わしていると解釈しうる。したがって、支川延長は河川比流量と増加関係にあり、河川流量流出解析に、さらに汚濁物の流出にも関係することがわかる。式-23と式-10, 11より

$$R = K(l/K_2)^n \quad (24)$$

を得る。今、BOD等の有機物質では、 $n \approx 1$ とすると、式-24は式25となり、

$$R = (K/K_2) \cdot l \quad (25)$$

汚濁流達率は支川延長に比例する。

(3) 比流量と流域緑地率

図-6に緑地率と比流量の関係を示す。比流量は緑地率 φ とほぼ一次の増加関係にある。

$$Q_0 = k\varphi \quad (26)$$

今、自然負荷が主な場合の汚濁流達率について考察してみる。式-10, 11より、汚濁流達率 R は、

$$R = K(SQ_0)^n \quad (27)$$

と表せる。

S_0 を流域内の緑地面積とすると、

$$\varphi = S_0/S \quad (28)$$

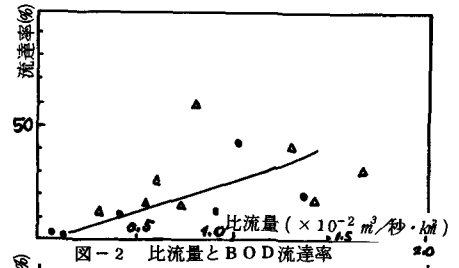


図-2 比流量とBOD流達率

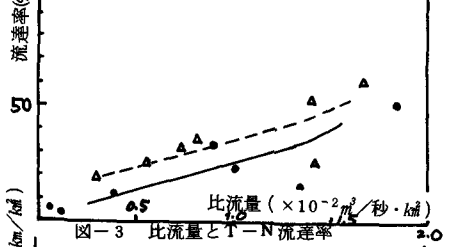


図-3 比流量とT-N流達率

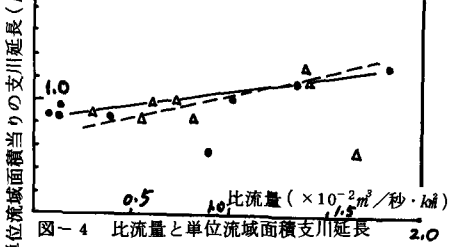


図-4 比流量と単位流域面積支川延長

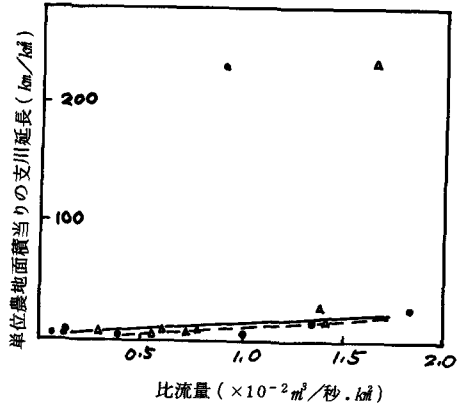


図-5 比流量と単位農地面積支川延長

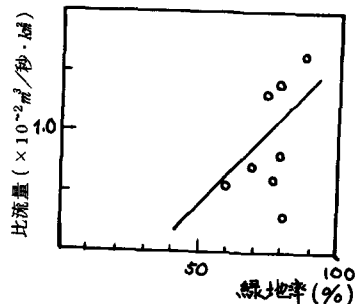


図-6 緑地率と比流量

式-26, 28より、

$$Q_0 = k (S_0 / S)$$

これを式-27に代入して

$$R = K (k S_0)^n \quad (29)$$

を得る。

すなわち、自然汚濁が主な場合の流出においては、河川流量は保水力に関係し緑地量がそれと線型の関係を保つことになる。

4. ま と め

汚濁流達率の概念を明確にし、その特性を明らかにするとともに、従来の研究を分類し、成果と問題点の現状を明らかにした。紙面の関係上、ここでは自然地域の汚濁流達率について主として緑地と流量に焦点をあてて研究結果の一部を示した。得られた結果は、①中小河川において汚濁流達率は上流負荷量の小さい場合には、河川の減衰率と地域の汚濁流出率の積として表わされる。②汚濁流達率は水系への汚濁流出のパターンによって異なり、圃場整備、河川改修も含めて、地域の流出のパターンの変化は汚濁流出、汚濁流達に影響を与えている。③河川の減衰率、汚濁流達率は流量のべき乗の関数として表される。④汚濁流達率は支川延長に比例し、流域の大小は汚濁流出に関係する。⑤比流量と単位面積当りの支川延長は一次関係にあり、支川延長は流出の解析の評価尺度になりうる。⑥比流量と流域緑地率は増加関係にあり、緑地がふえると河川流量は増加の傾向にある。⑦非かんがい期は汚濁流達率は高くなり、農地面積の大きいほど、かんがい期の汚濁流達率は小さい。⑧汚濁流達率は農地面積に反比例し、自然容量のある地域においては農地の効果が大きい。

参 考 文 献

- 1) 和田, 中尾; 自然容量をもつ地域の汚濁負荷収支と汚濁流達率の研究、公害と対策 vol. 12, №6, №7, №10, №11, 1976年6月~11月
- 2) 松本, 市川他; 阿武隈川の自浄作用, 下水道協会誌, vol. 10, №107, 1973年4月
- 3) 住友, 松尾; メッシュ法による汚濁分析と水質流出率に関する検討, 第9回衛生工学研究討論会論文集, 1973年1月
- 4) 村上; 河川の自浄作用及び汚濁負荷の流出率について, 土木学会, 第5回衛生工学研究討論会論文集, 1968年1月
- 5) 稲場, 堂々他; 汚濁負荷流出率の実態調査, 第9回下水道研究発表会講演集, 1972年5月
- 6) 那須; 河川の水質汚濁解析と水質予知へのアプローチ, 第8回水質汚濁研究に関するシンポジウム講演集, 日本水質汚濁研究会, 昭和49年9月
- 7) 和田; 下水排除施設未整備地域の汚濁流達率の研究, 下水道協会誌, vol. 13, №144, 1976年5月
- 8) 和田; 下水排除整備地域の汚濁流達率の研究, 下水道協会誌, vol. 13, №144, 1976年6月