〈講座〉

水質汚濁現象の数値モデル

(3) 負荷発生と流出・流達モデル

海老瀬 潜 一*
Senichi EBISE

1. 負荷の発生・流出・流達過程

流水には、物質を溶解させたり浮遊させたりする水の性質に加えて、物質を輸送したり侵食したりする性質がある。流域における流水中の物質移動現象が、負荷の流出・流達過程そのものであり、その結果としての一定期間の物質収支が流出率・流達率である。物質の原位置からの移動開始が負荷の発生過程であり、降雨が入力として重要な役割を演ずることになる。したがって、負荷の発生過程・流出過程の究明には水質水文学的アプローチが、負荷の流出過程・流達過程の究明には水質水理学的アプローチが必要となる。

一般に、土壌や大気からの降下物はむろんのこと、地上および地表面に近い地中に存在する物質の一部は、水を介して、みずみちや水路などいろいろな径路を経て下流へと流送される。また、生活や生産に利用された用水は、排水として人為的に強制排出される。流水は、流出・流達過程において、水量の変化に加えて水質の変化も伴う。この物質移動現象ゆえに、流出率・流達率の概念が自浄作用の概念とともに物質収支の中に組み入れられることになる。

河川・湖沼や内湾・内海などの公共水域に流入する物質は、排水処理装置への流入物質の場合と同様に、水域に対する負荷(load)として考えられてきた。この公共水域への流入物質を原位置で供給する源(source)が負

荷発生源あるいは負荷排出源である。したがって、一旦流下を始めた物質が、沈殿や貯留などによって流下途中の段階で多量に滞留している場所は、厳密には、負荷発生源とは言えない。

流域における負荷の発生過程、流出過程・流達過程を模式的に示したものが図1である。このように、負荷の発生は降雨量や流量などの水文学量に大きく支配され、水路や河川における水質の挙動は水理量に支配されることになる。

2. 負荷発生源の分類

負荷発生源は、流出を開始する物質の原位置での存在形態や排出形態によって分類される。工場排水、下水および尿処理場排水、生活排水、事業所排水、畜舎排水などのように排出源が特定でき、排出のための管渠・水路等の輸送手段を有し、排出前に在来の排水処理が可能な排出源を点源(point source)と言い、特定汚染源とも称する。これに対して、道路や屋根等の不透水性地表面の集中する市街地、水田・畑地・樹園地等の農耕地、山地のように排出源を個々に特定することが難しく、排出前に排水を集めて処理することが困難で、面的な広が

表1 面源負荷

1. 降水	(Rain fall)
2. 非かんがい農地	(Non-irrigated agriculture)
3. かんがい農地	(Irrigated agriculture)
4. 給飼場	(Feedlots)
5. 植林地	(Silviculture)
6. 都市流出	(Urban Run off)
7. 建設工事	(Construction)
8. 鉱山(石炭鉱山を除く)	(Non-Coal Mining)
9. 廃棄物処理場	(Residual Waste Management)
10. 浄化槽	(Septic tanks)

図1 負荷の発生過程および流達・流出過程

* 国立公害研究所水質土壌環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16-2 National Institute for Environmental Studies, (16-2, Onogawa Yatabe-machi Tsukuba-gun Ibaraki Japan 305)

りを有する排出源を面源 (non-point source) と言い、非特定汚染源とも称する。この面源は、人為的な灌漑のある農耕地をも含めて、降水を介して負荷が発生するのが特徴である。これらの負荷発生源の分類をまとめて、表 1 に示す¹⁾。

しかし、負荷発生源は必ずしも点源と面源の 2 つに明確に分けられるものではなく、両者の中間的な性格の負荷発生源も存在する。また、点源と面源という定義では不十分な場合もある。各地に線状に延びる道路は線源と称するのがふさわしい。面源負荷は、地表面が浸透性が不浸透性によって、面源と、体源あるいは塊源と称すべき負荷発生源に 2 分できる。不浸透面積比率の高い市街地は面源に相当するが、浸透性の地表面の農耕地や山地に加えて廃棄物の処分地などは体源に相当する。すなわち、地表面上を流去する物質、地表面下に浸透し、再び地表面に現われるか、そのまま地中を移動して公共水域に流入する物質など、その公共水域への流入経路をも考慮すると、面的な広がりに加えて、鉛直方向の厚みをも考えねばならないことが多い。

3. 負荷の発生・排出形態

負荷の発生は、発生源が面源か点源かでその排出形態あるいは排出機構が大きく異なるため、2 つに分けて取り扱うことにする。

(1) 点源負荷

点源負荷の排出は、用水としての使用状況に応じて、取水時とは異なったパターンとなることが多い。無処理で排出される場合と、排水処理の後排出される場合とでは、処理装置の運転状況によって、排出パターンに時間的なズレがある。排水の排出パターンは、連続的な排出の場合と回分的な排出の場合との 2 つに分けられる。連続的な排出の場合でも、一定量の連続排出のパターンは少く、周期的な変化パターンであることが多い。

排出負荷量の算定は、原則的には実測値によるが、同業種の排水に対して統計的な平均値として、排出原単位が求められており、おおよその推定値を知ることができる。排出原単位は、排出源の規模によっても異なるが、排水量当りおよび出荷額当りで算定される工場排水、構成員数当りで算定される生活排水などがある。排出原単位は、統計量であり、個々の排出源に対しての適用には問題が多い。広い地域について、また、1 年間程度の長期間の平均値として、総排出量の概算的な推定や排出源間の相対的なウェイトの比較などに利用できる。

排出負荷量は、それぞれの水質項目ごとの排出原単位に、排水量と出荷額、あるいは、構成員数を乗じて算出されるが、排水処理がなされる場合は、さらに除去率を乗ずることによって算定される。

また、生活排水に関しては、厨房・浴室・洗濯等の雑排水と、し尿排水との 2 つがあり、下水道の有無、し尿処理場と合併処理の有無、浄化槽処理、農地還元、系外処分 (海洋投棄) 等によって、排出負荷量の算定が異なることに留意しなければならない。

(2) 面源負荷

面源負荷の発生は、水田のように人為的な灌漑システムの確立している場合を除き、降雨を介して引き起こされる。すなわち、降雨による負荷の「洗い出し作用」であり、「洗い流し作用」である。雨滴による剝離、表流水による浸食、降水による溶脱などの物理的および化学的な発生機構に、流水の運搬機構が加わり、流出物質が原位置から流去する。流出物質の形態、溶存態であるか粒状態であるかによって、負荷の発生および流送形態も異なり、雨水の流出成分がこれを支配する。

このように、降雨によって流域から洗い出される負荷の発生は、降雨条件と流域の土地利用形態とに支配される。降雨条件には、降雨量、降雨強度、降雨継続時間および先行降雨が挙げられる²⁾。流域の土地利用形態とは、山地、水田、畑地、樹園地、市街地等の大別だけでなく、植生や地質に加えて、市街地のように用途地域や表面工種の細別ごとに異なる負荷発生の流域特性および流出特性である。このように、降雨を入力とする流域の応答としての負荷発生形態となる。

降雨と流域との接触面である地表面での浸透能に基づいた雨水の分離過程は、表面流出の発生とその規模を左右し、負荷の発生のみでなく水文学的に重要な過程である。雨水の流出は、図 2 に示すように表面流出、中間流出、地下水流出に分けられる³⁾。粒状態物質のほとんどは、雨水浸透能を上回る降雨強度の大きな降雨や降雨量の大きな降雨の場合に生ずる表面流出によって地表流として地表面上を流下する。むしろ、流下の途中の凹地で貯留されたり、降雨水自体に含まれていた溶存態および粒状態物質に加えて、先行降雨や先に一時貯留されていた溶存態および粒状態物質のほか、降雨水により粒状態物質より脱着あるいは溶解した溶存態物質も流下する。

図 2 降雨の流出の過程と成分の構図

この一時貯留や水質の形態変化のゆえに、流出率・流達率の概念が組み入れられることになるのである。

地表面下に浸透した雨水は、以前から保持されていた土壌水分を下方や側方に追いやり、土壌粒子や水分との間での水質交換（溶出や吸・脱着など）を行ないながら、鉛直下方に移動（降下浸透）するだけでなく横方向にも移動（側方浸透）し、山腹や丘陵地の斜面などから地表面に再び現われる中間流出と、降下浸透に支配されながら地中を移動し、そのまま公共用水域の水表面下に流入する地下水流出の2つに分かれる。また、中間流出には、表層から流出するため、表面流出より遅れて流出が始まるものの、比較的早い時期に流出して表面流出とともに直接流出（短期流出・洪水流出）を構成する早い中間流出と、地中での滞留時間が大きく、直接流出よりはかなり遅れて地層境界より流出して、地下水流出とともに間接流出（長期流出・低水流出）を構成する遅い中間流出とに分けられる。

この地表面での浸透能に基づいた雨水の分離過程は、表面流出の発生とその規模を左右するのみではなく、面源負荷の存在位置と存在形態との係わりを通して、面源負荷の発生過程を規定することになる。一般に、市街地のように屋根、道路などの不透水性地表面上の堆積負荷は顕在負荷であり、真の面源負荷であり、その負荷量は先行降雨後の無降雨期間が長くても有限量であると考えられる。これに対して、山地と農耕地のように、面的な広がりに加えて鉛直方向の厚みを有する浸透性地表面からの発生負荷は、体源負荷であり、潜在負荷であり、その負荷量は規模の大きな降雨に対してほぼ無限として扱える量である。

したがって、市街地での路面堆積負荷量の堆定モデルは、図3の米国の Sartor⁴⁾による用途地域別の堆積負荷量調査結果に見られるように、経過日数に対して堆積負荷量の増加量が鈍化したり、上限値のあるようなモデル式がほとんどである。これに対して、米国農務省によって開発された裸地の土壌侵蝕による流出土砂量は、地形、表層土の状態、侵食し易さに加えて、降雨量に比例する関数形がとられている⁵⁾。

降水自体も負荷発生源であり、河道や湖面など公共用

図3 土地利用形態別の汚濁物の蓄積量変化

水域への降水は直接的な負荷で、流出率・流達率は関係しない。降雨・降雪は、そのひと雨、一降雪の中でもその含有量に変化し、大気汚染状態を反映したものとなる。降雨初期や雨滴の小さな降雨ほど高濃度の含有物を有している。これは、降雨のレイン・アウト（rain out）とウォッシュ・アウト（wash out）の両作用によって大気中の物質を捕捉して降下するからである。雨水は、雨滴として表土の剝離のほか、酸性雨は表土層のカルシウムやマグネシウムなどの無機塩類を溶かし出す作用も有している。一般には、1カ月間ごとや1降雨ごとの年間平均値としての降水濃度に降水量を乗じて、降水負荷量が求められる。

4. 負荷発生・排出のモデル解析

(1) 点源負荷

点源負荷は、人為的に強制排出されることが多いが、その排出パターンは、用水としての取水パターンに滞留時間分の流出の時間遅れを考慮すれば推定も可能となる。一定の地域や処理場からの排水は、排水路等での観測値の統計的な解析法、たとえば、調和分析を含む時系列解析⁶⁾、重回帰式⁷⁾、カルマンフィルタ法⁸⁾、GMDH法⁹⁾¹⁰⁾などによって、推定や予測も可能である。一定期間の総排出負荷量の算定は、排出源それぞれの排水源単位を求めて、排水量や出荷額あるいは構成員数を乗じ、除去率を考慮し、統計的な平均値として求められる。

(2) 面源負荷

面源負荷では、対象が浸透性地表面か不透透性地表面かによって、その負荷発生の機構が異なる。市街地では、屋根や道路の不透透性地表面における堆積負荷量が降雨に伴う排出負荷量を支配するポテンシャル量となり、実測とモデル化の進んでいる現象である。また、浸透性地表面では、農地保全上の観点から畑地を中心とした裸地の降雨による土壌侵蝕量の予測モデルが提案されている。このほか、雨滴による土砂の剝離量、表流水による侵食量などについては、モデル化がなされている。

これらいずれの現象も、その物理的機構が完全に解明されているとは言えないが、それに関与する多くの因子のうちから重要な因子を抜き出し、次元解析的なモデル式が展開されている場合が多い。これは、現象の再現性のなさ、現象の場の非一様さ、ヒステリシスなどによるためと考えられる。

このほか、山地、水田、畑地など同一の土地利用形態の地域からの排出量に関する実測値が収集されつつある。農耕地、とくに水田については、施肥量と排出負荷量の関係からの調査が重ねられ、灌漑期の排出負荷量の原単位が単位面積当りの値として物質収支から算定されている¹¹⁾。しかし、非灌漑期の問題や降雨溢流水の問題が残

されている。一般に、山地、農耕地については、それらの負荷が主たるウェイトを占める地域からの排水路や河川の流出負荷量調査結果から、その単位面積当りの原単位を算定する手法がとられるが、潜在負荷量の降雨時流出分を補正しないと、晴天時流出分の負荷量だけではかなりの過小評価となる。これは、面源負荷量に対する時間スケールのとり方、あるいは、期間平均値的な統計量に対する現象変化の時間や現象の生起確率との関係が妥当なものではないことに起因している。この現象把握の時間スケールと対応するモデル構築の関係は、フロリダ大学が提案した分類法によれば、4つのレベルに分けられる¹⁾。時々刻々排出負荷量を予測する、(ii)ポリュートグラフ(水質濃度変化曲線)を予測する、(iii)ひと雨降雨による総流出負荷量を予測する、(iv)年間総流出負荷量を予測する、の時間スケールの異なる4つのレベルのモデルである。

一般に、負荷の発生・排出の機構を考慮しながらも、地域全体という空間スケールの広がりからも、ブラックボックスのモデルが多いのが現状である。ここでは、負荷の発生場に注目したモデルを取扱い市街地での堆積負荷量のモデルと、土壌流出のモデルを示し、降雨に伴う流出負荷量解析の例を次節で取り扱うことにする。

(a) 市街地の堆積負荷量モデル

路面に堆積する汚濁物質の現存量変化は、図3に示すSartorの調査結果のように、指数関数的な増加パターンとなる。この有機物質の堆積負荷量に、生化学的な分解により一部減衰することを考慮したのが稲場¹²⁾である。BODを想定し、路面堆積量 S は、無降雨日数 n について次式で表わされる。

$$S = \frac{a}{k_1} (1 - e^{-k_1 \cdot n}) \quad (n \leq n_0) \quad (1)$$

$$S = \frac{a}{k_1} (1 - e^{-k_1 \cdot n_0}) + \frac{a}{k_2} e^{-k_1 \cdot n_0} \left\{ 1 - e^{-k_2 \cdot (n - n_0)} \right\} \quad (n > n_0) \quad (2)$$

ここで、 k_1 : 1次反応速度定数、

k_2 : 2次反応速度定数、

n_0 : 2次反応に移るまでの日数、

a : 堆積物質供給速度、

路面堆積負荷量に残留率の概念を導入したのが中村¹³⁾である。路面堆積負荷量 S には上限値 $S_{\max}$ が存在するとし、堆積負荷の供給量を a 、その負荷量 S がその地点に残留する確率 p を用いて、

$$p = 1 - S / S_{\max} \quad (3)$$

したがって、残留負荷量は、 $S + a \cdot p$ 、となるから、晴天が継続した場合の単位時間当りの堆積負荷量は、

$$dS/dt = p \cdot a = a \cdot (1 - S / S_{\max}) \quad (4)$$

$$S = S_{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{a}{S_{\max}} \cdot t}) \quad (5)$$

一般に、路面堆積負荷量は交通量や清掃回数に大きく影響され、 a の算定は用途地域ごとに行なう必要がある。

(b) 土壌流出モデル

降雨による侵食土砂量は、雨滴による剥離が約80%、表流水による侵食が10~20%であると言われている。米国農務省が開発したモデルは、土壌流出量 A が降雨量 R 、侵食し易さ K 、地形(主に流路勾配) LS 、表層土の状態 C に加えて、そこで実施されている対応策によって決定する因子 P の関数で表わされるとしている¹⁴⁾。

$$A = f(R, K, LS, C, P) \quad (6)$$

これは、年間流出土砂量を求める次元解析的なモデルであるが、雨滴による土砂の剥離量は、さらに小さな時間スケールの現象として、Ellison¹⁵⁾によって提案された。30分間の雨滴による剥離量 E は、土によって定まる定数 K 、雨滴の落下速度 V (ft/sec)、雨滴の直径 D (mm)、降雨強度 P (in/hour)によって次式で表わされる。

$$E = K \cdot V^{4.33} \cdot D^{1.07} \cdot P^{0.65} \quad (7)$$

5. 降雨時流出負荷量変化のモデル解析

降雨を介して流出する負荷量解析は、降雨によって水質負荷量が変化する初期の時点から、ほぼ降雨前のレベルに戻る直接流出の期間を対象とするが、降雨の影響の小さな晴天時の流出負荷量の大きさも、そのベースを形成することから必要となる。また、必要とされる降雨による流出負荷量のレベルは、現象の時間スケールとの対応から、水文学や水理量の観測精度のレベルをも左右する。ここでも、地表面が浸透性か不浸透性かによって、物理的な機構が異なるため、そのモデルも2つに分けて取り扱うことにする。

(1) 市街地モデル

(a) STORMモデル

米国水資源局と陸軍工兵隊の協同開発によるモデルで、Storage Treatment Overflow Runoff Modelの頭文字の略称で知られている掃流負荷モデルである¹⁶⁾。時刻 t における汚濁物質の流出負荷量は、残存汚濁物質 P_p に比例するという仮定をし、定数を k として次式で表わされる。

$$dP_p/dt = -k \cdot P_p \quad (8)$$

さらに、 k が不浸透域からの流出水量に比例し、0.5 in/hr (= 1.27 cm/hr)の降雨強度の雨が1時間継続すれば堆積物質の90%が流出するという仮定より、 $k = 4.6 \cdot R$ (R は降雨強度)となり、(8)式はつぎの(9)式となる。

$$P_p(t + \Delta t) = P_p(t) \cdot e^{-4.6 R \cdot \Delta t} \quad (9)$$

したがって、堆積物質の流出速度 M_p は次式となる。

$$M_p = \frac{P_p(t + \Delta t) - P_p(t)}{\Delta t} = P(t) \cdot (1 - e^{-4.6 R \cdot \Delta t}) / \Delta t \quad (10)$$

この M_p に流域面積 S を乗ずれば、流域としての流出負荷量が計算できる。濃度は、 M_p を Δt 時間の流出水量で除することによって求まるが、実際には、Available factorを導入して補正される。Available factorは水質項目によって異なる。

(b) SWMMモデル

EPAが開発したStorm Water Management Model¹⁷⁾は、空間的かつ時間的に流出水量および流出負荷量の変化を追跡できるシミュレーションモデルである。対象とする水質項目は、BOD、SS、全リン、全窒素、グリーン、沈降性固形物、CODおよび大腸菌である。SWMMのフローシートを図4に示す。

下水道敷設流域を対象とするSWMMのぼう大なシミュレーションプログラムのうち、水質負荷量に関するものでは、下水管渠内の場合、管渠内での完全混合を仮定して、連続式を時間ステップごとに計算する手法となっている。計算機を利用するこの手法の詳細は省略する。

()内はサブルーチン名

図4 SWMMの概念図

(c) 土木研究所モデル

建設省土木研究所が合流式下水道の降雨時流出負荷量を予測するため開発したモデルである¹⁸⁾。降雨時の合流式下水管における流出負荷量 L と流量 Q との実測値の関係のプロットより、限界流量 Q_c の概念も取り入れて、つぎの2式で表わされるとした。

BODとCODについては、

$$L = C_1 \cdot (Q - Q_c) \quad (11)$$

SSについては、

$$L = C_2 \cdot Q \cdot (Q - Q_c) \quad (12)$$

ここで、 C_1 と C_2 は比例定数である。 Q_c は必ずしも限界掃流量ではなく、定数として取り扱われる。

さらに、流出負荷量 L と流量 Q の両対数紙上のプロットの関係が時計回りのループ特性を有することから、残存負荷量 P の関与を考慮して、(11)、(12)式はそれぞれ(13)、(14)式に書き改められた。

$$L = C_1 \cdot P^2 \cdot (Q - Q_c) \quad (13)$$

$$L = C_2 \cdot P \cdot Q \cdot (Q - Q_c) \quad (14)$$

また、降雨時には晴天時に管渠内に堆積した物質のほか、路面、屋根、雨水ます等に堆積した物質も流出する。それゆえ、その流出負荷量が管渠以外に堆積した汚濁物質質量 S と降雨強度 r に比例するととして、(13)、(14)式はそれぞれ(15)、(16)式に書き改められる。

$$L = C_1 \cdot P^2 \cdot (Q - Q_c) + \frac{k_1}{3.6} \cdot S \cdot r \quad (15)$$

$$L = C_2 \cdot P \cdot Q \cdot (Q - Q_c) + \frac{k_2}{3.6} \cdot S \cdot r \quad (16)$$

ここで、 k_1 、 k_2 は定数である。

(d) 完全混合槽モデル

高畑らが¹⁹⁾、降雨時の合流式下水道のCOD流出負荷量の予測のために提案したモデルである。降雨量のCOD負荷量流出特性が残存負荷量に影響されることが多いことを考慮し、排水区全体を1つの完全混合槽と見て、槽内濃度 C の連続式を、流入水濃度 C_i 、希釈率 D によって表わした。 t を時間にとると、

$$dC/dt = D \cdot (C_i - C) \quad (17)$$

流入水濃度 C_i が無視できるとして、槽容積 V を(17)式の両辺に乗じて、 $P = V \cdot C$ とおくと、

$$dP/dt = -D \cdot P \quad (18)$$

P は残留負荷量となる。さらに、希釈率 D が流入水量 Q を槽容積 V で除したものであることから、 $D = Q/V$ を(18)式に代入して、

$$dP/dt = -(Q/V) \cdot P \quad (19)$$

流入水量 Q が(20)式の正弦波で与えられるとすると、

$$Q = a \cdot \{1 + \sin(bt - c)\} \quad (20)$$

槽容積 V は、(21)式で与えられる。

$$V = a \cdot \{1 + \sin(bt - c)\}^2 / \{b \cdot \cos(bt - c)\} \quad (21)$$

(20)、(21)式を(19)式に代入して、

$$P(t + \Delta t) = P(t) \cdot e^{-\frac{Q}{V} \Delta t} \quad (22)$$

さらに、 t と $t + \Delta t$ 間の単位時間当りのCOD流出負荷量 $L(t)$ は、次式で与えられる。

$$L(t) = \left\{ P(t) - P(t + \Delta t) \right\} / \Delta t = \left\{ P(t) / \Delta t \right\} \cdot (1 - e^{-\frac{Q}{V} \Delta t}) \quad (23)$$

(2) 浸透域モデル (タンクモデル)

これは、潜在負荷が大きく、面源というより体源と称するのがふさわしい浸透性地表面での降雨時流出負荷量変化を、流出機構の水文学的特性を考慮した海老瀬らの

モデルである²⁰⁾。浸透性地表面地域では、降雨量や降雨強度の大きな降雨の場合の表面流出のほか、地表面下の浅い表土層からの中間流出のウェイトが高い。したがって、降雨に伴う流出負荷量も侵食や堆積負荷の掃流のほか、浸透流出による表土層の溶脱負荷量がかなりのウェイトを占めることになる。

浸透域では、降雨流出成分が水文学的に表面流出、中間流出および地下水流出の3つに分けられることを考慮して、各々の流出成分によって流出する負荷量を個々に算定することを考える。各流出成分の分離には、各流域の実情に適応しやすく、計算の容易な菅原のタンクモデルを利用する。図5に示すように、流域は原則として2

図5 2段直列タンクモデル

段直列タンクとして、上段タンクから表面流出 Q_1 、下段タンクから中間流出 Q_2 、地下水流出 Q_0 が生ずると考える。したがって、全流量 Q は、3流出成分の和となる。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_0 \quad (24)$$

溶存態物質の流出負荷量 L は、各流出成分による負荷量 L_i がそれぞれの流出成分の流量 Q_i に比例するとして、その線形結合で表わされる。基底負荷量を $L_0 = a_0 \cdot Q_0$ とし、

$$L = L_1 + L_2 + L_0 = a_1 \cdot Q_1 + a_2 \cdot Q_2 + a_0 \cdot Q_0 \quad (25)$$

ここで、 a_i は定数と考えるが濃度にあたる。

懸濁態物質については、地表面上の残存負荷量 $S(t)$ が表面流出によって流出することを考慮して、表面流出には土木研究所モデルを用い、中間流出には流出負荷量が流量の自乗に比例するとして、

$$L = a_1 \cdot S(t)^m \cdot Q_1 \cdot (Q_1 - Q_c) + a_2 \cdot Q_2^2 + L_0 \quad (26)$$

ここで、地表面負荷量 $S(t)$ は、初期残存負荷量を S_0 とし、つぎの連続式を満足する。

$$S(t) = S_0 + S_0^{\frac{1}{m}} S(t)^m \cdot Q_1 \cdot (Q_1 - Q_c) dt \quad (27)$$

定数決定には、(i)負荷量のピーク出現時刻とピーク値、(ii)総流出負荷量、(iii)負荷量の減衰状態、の合致に重点を置く。(i)については a_1 、 m 、 S_0 、(iii)については a_2 が大きく影響するが、(i)、(iii)が満たされれば(ii)の条件には問題が少い。

6. 1 降雨総流出負荷量解析モデル

1 降雨ごとの総流出負荷量は、前節の流出負荷量変化のモデルから積分して算定可能であるが、水質濃度の実測データがなく、降雨量や流量のデータのみから予測するモデルを紹介する。

(1) 分流式雨水渠のモデル

分流式下水道の整備された市街地の雨水渠からの放流水が公共用水域に与える影響を推定するモデルとして、中村が提案したモデルである²¹⁾。

1 降雨による総流出負荷量 ΣL は、総流出水量 Σre (mm)、平均有効降雨強度 re (mm/hr)および先行降雨係数 APF (mm/day)の関数であるとし、これらの多項式で表わされる次式を提示した。

$$\Sigma L = a \cdot \Sigma re + b \cdot \bar{re} + c \cdot APF + d \quad (28)$$

ここで、 a 、 b 、 c 、 d は定数であり、 APF は、

$$APF = \sum_{t=1}^n R_t / t \quad (29)$$

ここで、 R_t は t 日目の降雨量(mm)であり、 n は5が適当であるとしている。観測結果より求めた定数の値と重相関係数 mr の例を表2に示すが、定数は全ての排水区で共通でない。

表2 回帰係数と重相関係数

	a	b	c	d	m. r.
BOD	0.0406	0.3057	-0.0736	1.0653	0.9378
COD	0.0730	0.3666	-0.1936	1.3221	0.9132
SS	0.6934	1.4735	-1.4222	12.0607	0.9930

図6 降雨時流出の累加流量 ΣQ とSS累加負荷量 ΣL の関係

(2) 中 小 河 川

中小河川では、流域内の降雨分布の一樣さ、各地点からの流出の時間遅れの小ささで、大河川とはその流出特性が異なる。また、降雨に伴う流出負荷量では、懸濁態物質のウェイトが大きいことに注目して、数多くの観測例をもとに海老瀬が提案したモデルである²²⁾。降雨に伴う初期流出から減衰期までの流出負荷量の累加量を、流出水量の累加量を対比させると、図6のように両対数紙上で累加流出負荷量の増加が小さくなり頭打ちの現象を呈することを利用したものである。降雨の流出初期から流出水量の多い減期の負荷量レベルがほぼ降雨前の状態に戻る時点までを対象とし、その総流出負荷量 ΣL と総流出水量 ΣQ の関係を、多くの河川あるいは流域、多くの降雨について集める。さらに、一般性をもたせるために、流域規模の大きさの影響を流域面積 A で除することによって除去して、両数紙上に $\Sigma L/A$ と $\Sigma Q/A$ をプロットする。これがある範囲内におさまるため、つぎのような回帰モデルとすることができる。

$$\Sigma L/A = a \cdot (\Sigma Q/A)^n \quad (30)$$

ここで、 $\Sigma Q/A$ は直接流出の有効雨量である。さらに、降雨ごとの流出特性の相違を一般化して比較するために、有効雨量を降雨の実質的な継続時間 T で除した平均降雨強度 $\Sigma Q/(A \cdot T)$ に対して、 $\Sigma L/A$ をプロットして同様の回帰モデルを求めることができる。

$$\Sigma L/A = b \cdot \left\{ \Sigma Q / (A \cdot T) \right\}^m \quad (31)$$

この回帰モデルは、市街地河川、農耕地河川、山地河川等の流域の土地利用形態との関連から、それぞれのグループで回帰定数を求める方がよい。さらに進んで、1河川あるいは1流域ごとにそれ自体の回帰定数が定まれば ΣL の算定精度が上がることになる。

7. 観測データによる晴天時分・降雨時分の分離法

河川で毎日1回定時の、あるいは、それ以上の頻度の流量および水質濃度の連続観測がなされている場合、流出負荷量の変化から、晴天時流出分と降雨時流出分に分離し、両者のウェイトを明らかにする手法がある。

(1) Ripple 図 法

河川流出負荷量の毎日定時の連続観測データより、流量および各水質項目ごとの負荷量の日データを累加量の日変化として1年間累積量を100%として図示する。これが図7に示すRipple図であり、市川によって提案されたものである²³⁾。図中の流量および負荷量の累積値の時間軸に対する急激な増加分(階段状の上昇分)が降雨時流出負荷量に相当し、流量および負荷量の累積値が一定勾配で増加状態にあるものが晴天時流出負荷量に対応する。懸濁態成分のウェイトの高い大きな降雨流出の分離

に向いており、溶存態物質や降雨量の小さい場合は、累積量の変化が小さく、降雨時流出負荷量の影響が小さいことが理解できる。

図7 累積汚濁負荷曲線 (Ripple 図)

(2) 流量の大きさによる分離法

建設省土木研究所の山口らが提案した分離法で²⁴⁾、1年間の日流量観測値を最大流量から最小流量まで流量規模別に整理する。超過確率で75% (低水流量)、50% (平水流量)、25% (豊水流量)、10%、5%以上の分類グループごとの負荷量のウェイトを示し、低水流量以下の流量時の負荷量平均値を晴天時流出分、あるいは、低水流量時の負荷量を晴天時流出分にする場合の例を示した。これによって高流量時、したがって、降雨時の流出負荷量の高いウェイトが明らかにされた。

8. 流出率・流達率と期間流出負荷量

河川におけるDO変化とBODの関係および河川の自浄作用の研究の歴史は古い。しかし、流出率・流達率に関する研究はあまり進んでいるとは言えず、その定義自体も河川の水質汚濁関係で慣習的に使っているものと、流域下水道の分野で使用されているものと必ずしも一致していない。また、流出率は水文学の分野で古くから使われており、まぎらわしいため、流達率のみが使用されることもある。このため、次式の定義を用いる。

$$\text{流入負荷量} = \text{排出負荷量} \times \text{流達率}$$

$$\text{流達負荷量} = \text{流入負荷量} \times \text{流出率}$$

$$= \text{流入負荷量} \times (1 - \text{浄化率})$$

河川への流入負荷量は、流域内の先行降雨で流出しなかった残存物質や先行降雨後に新たに加わった新生物質で構成されるが、1降雨で全部流出することは少ない。流出可能な物質で原位置から流出しなかった分の負荷量、「積み残し」負荷量が存在する。また、一旦原位置より流出を始めたが、流下途中で流速・流量の減少に伴ない

貯留・堆積した「荷くずれ」負荷量が存在する。この「荷くずれ」負荷量が、つぎの降雨で流出しきれない場合もある。また、排水路・溝などの貯留・堆積物は清掃によって除去されることもあり、貯留・堆積期間中に一部分分解され、減少や形態変化を伴うこともある。したがって、流出物質の流出所要時間あるいは流域内滞留時間という時間スケールを考慮する必要がある。

たとえば、一定の河川区間における河道内貯留・堆積物質の量と質（構成内容）が1年間で大きく変化していないならば、脱窒・分解等の作用によって系外に除去された分を除き、流入負荷量は全て下流まで達していると考えられる。それゆえ、短期間の沈殿・堆積によって一時的に流出率を減少させても、その後の大規模な降雨によって流出してしまえば、真の流達率が高くなるのが実情である。まず、水質項目ごとに系外への除去速度の大きさを明らかにする必要がある。

降雨は4～5日に1度の頻度で生ずることが多い。しかし、その内訳は10 mm未満の降雨が大半で、10 mm未満の降雨は流出負荷量への影響が小さいのが通常である²²⁾。残る10 mm以上の降雨は頻度こそ低い、流出負荷量への影響の大きさも前節の例からも明らかである。したがって、降雨による流出負荷量を含めない晴天時の流出負荷量をもとにした期間流出負荷量の算定は、過小評価となる。また、期間流出負荷量は固定したものではなく、期間内の降雨内容によって異なる。したがって、当然のことながら、流出率・流達率も変化する。

流域内の流出負荷量を推定する場合に、原単位に実際の規模あるいは、計画規模（フレーム）を乗じて、さらに流達率・流出率も加味される。対象とされる公共水域は湖沼や内湾等の閉鎖性水域であることが多い。その公共水域の滞留時間と期間流出負荷量の対応を考えれば、時間スケールを考慮した流達率・流出率であるべきである。

これまで流達率・流出率の調査は、調査の困難さから晴天時を主体に行なわれてきた。たとえ晴天時でも、上下流2地点間での流出率調査は、2地点間の流下時間のtime lag（時間遅れ）をおいた厳密な24時間調査が行なわれるべきである。そして、期間流出負荷量の算定の場合と同様に、降雨時流出分の補正が必要である²²⁾。これまで、第6節のモデルを利用した期間流出負荷量の推定値や、第7節の実測値の分離法より、降雨時流出分のウェイトは晴天時流出分と同等か、それを上回ることが多い。原単位法による排出負荷量推定値と流出負荷量実測値より求めた流達率は、小河川で2前後の報告もある²⁵⁾。また、図8のように流域特性と流達率の関係を求めた研究もある^{26) 27) 28) 29)}。今後は、現象の時間スケールとの対応を明らかにして、多くの研究成果が蓄積されれば、

図8 流達率の推定法

精度の高い議論の展開がなされることになろう。

（原稿受理 昭和58年3月7日）

— 引 用 文 献 —

- 市川新（1982）非特定汚染源による水質汚濁に関する研究の意義と現状、公害と対策、18、315-319
- 海老瀬潜一（1982）非特定汚染源負荷の流出特性、公害と対策、18、321-326
- Chow, V. T (1964) Handbook of Applied Hydrology, 14-3pp., McGraw-Hill
- Sartor, J. D. et al (1974) Water Pollution Aspect of Street Surface Contaminants, Jour. of W. P. C. F., 46, 458-467
- 市川新（1980）都市河川の環境科学、200pp., 培風館
- 合田健ほか（1977）ダム貯水池の水質変化と富栄養化、土木学会論文報告集、260、59-73、
- 羽田守夫（1978）水文因子による河川の水質変動の評価について、環境問題シンポジウム講演論文集（土木学会）、71-77
- 寺島泰（1975）河川水質日変動特性の解析ならびに重回帰分析、Kalman filterによる日変動予測、第11回衛生工学研究討論会講演論文集（土木学会）、130-135
- 市川新ほか（1976）発見的自己組織化法による水質予測、土木学会論文報告集、246、47-56
- 山村優ほか（1979）GMDHによる下水処理場の放流水質の推定モデル、水質汚濁研究、2、203-213
- 中田均（1978）水田からの肥料成分の流出について、関西土壤肥料協議会講演要旨、49、1-15
- 稲場紀久雄（1975）雨天時下水道水量水質の制御に関する研究、京都大学学位論文
- 中村栄一（1980）合流式下水道対策の検討（第Ⅱ報）、第16回衛生工学研究討論会講演論文集（土

- 木学会), 154-159
- 14) 今尾昭夫 (1981) アメリカにおける土壌侵食研究, 農業土木学会誌, 49, 602pp.,
- 15) Ellison, W. D. (1945) Some effects of rain-drops and surface-flow on soil erosion and infiltration, *Trans. of A. G. U.*, 26, 415-429,
- 16) U. S. Army Corps of Engineer (1976) Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model, "STORM", 723-S8-L7520
- 17) Metcalf & Eddy (1971) Storm Water Management Model, Univ. of Florida, Water Resources Engineers, EPA 11024 DOC 07/71,
- 18) 栗林宗人 (1977) 日本における合流式下水道問題とその対策の現状, 第7回日米下水処理技術委員会会議録, II-2-23
- 19) 高畑征三郎ほか (1976) 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講演論文集 (土木学会), 108-113
- 20) 海老瀬潜一ほか (1979) タンクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析, 用水と廃水, 21, 1422-1432
- 21) 中村栄一ほか (1979) 合流式下水道対策の検討 (第I報), 第15回衛生工学研究討論会講演論文集 (土木学会), 84-89
- 22) 海老瀬潜一 (1981) 霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価, 国立公害研究所研究報告, 第21号,
- 23) 市川新ほか (1980) 累積汚濁負荷曲線 (Ripple 図) による年間負荷量の解析, 第14回水質汚濁研究会年次学術講演会講演集, 51-52
- 24) 山口高志ほか (1978) 河川の水質・汚濁負荷量に関する研究(Ⅲ), 土木研究所報告, 第151号, 89-141
- 25) 浮田正夫ほか (1976) 小河川におけるM, P流達率に関する研究, 第12回衛生工学研究討論会講演論文集 (土木学会), 114-119
- 26) 村上健 (1968) 河川の自浄作用および汚濁負荷の流出率について, 第5回衛生工学研究討論会講演論文集 (土木学会), 1-10
- 27) 和田安彦 (1981) 中小河川における汚濁流出特性, 水質汚濁研究, 4, 9-17
- 28) 浅野富夫ほか (1981) 流域土地利用を考慮した雨天時水質の挙動について, 第25回水理講演会論文集 (土木学会), 411-416
- 29) 建設省 (1980) 流域別下水道整備総合計画調査, 指針と解説, 日本下水道協会