

水質タンクモデルを用いた 都市域中小河川における 異常渇水時の汚濁物流出解析

SIMULATIONS OF POLLUTANT RUNOFF
FROM A SMALL RIVER BASIN IN AN URBAN AREA
DURING A DROUGHT PERIOD USING WATER QUALITY TANK-MODEL

市木 敦之¹・山田 淳²
Atsushi ICHIKI and Kiyoshi YAMADA

¹正会員 工修 立命館大学助手 理工学部環境システム工学科(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部環境システム工学科(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

The objectives of this study are to simulate pollutant runoff from a small river basin in an urban area, and to estimate the effect of the 1994 drought on pollutant runoff. The simulations using the series of precipitation data of 1994 as a drought year and 1986 as a normal year were done by the Water Quality Tank-Model. As a result of the simulations, findings were: (1)The amount of annual runoff pollutant load in 1994 was almost same as the amount in 1986. (2)It was proved that the pollutants which had accumulated during a drought period of 1994 summer, ran off at a stretch by a large storm in the middle of September. And (3)it had a great influence upon water quality in receiving water.

In the result, some available information for the environmental management of water in urban areas during a drought period have been obtained.

Key Words : *drought period, environmental management, pollutant runoff,
urban nonpoint source, Water Quality Tank-Model*

1. はじめに

1994年の夏は、記録的な高温と小雨であり、西日本を中心に全国的な渇水に見舞われた。こうした渇水自体を取り扱った研究¹⁾や渇水の影響評価に関する調査は、顕著な渇水が起こる都度数多く行われており、たとえば1984年渇水の際には、1874年からの水位観測史上3番目に相当するマイナス0.95mを記録した琵琶湖を対象とした國松の報告²⁾や、東北地方の一級河川雄物川における羽田ほかの水質実測調査³⁾が実施されている。1994年渇水についても、既に全国的な渇水の概況や関連する諸分野・地域における渇水対策の状況⁴⁾、および琵琶湖・淀川水系における水位・水質変動⁵⁾に関する報告が行われている。また、一部ではこの渇水のために流入河川からの汚濁物供給量が減少し、琵琶湖の透明度が数十年前の状態にまで大きく改善されたとの報道も行われている。しかし、これらの研究報告は、いずれも、渇水時の水源水量確保か、あるいは水源水質自体の影響評価を目的としたものであり、渇水時の汚濁物

流出管理を目的として、集水域から水源へ供給される汚濁物の挙動特性について解析・予測された例はない。

流出現象は、発生源からの流達過程や河道内での流下過程の差異に加え微地形による影響も受けやすいめ、流出モデルを微分方程式によって完全に表現することには困難な点が多い。流域内の下水道整備や都市化の状況と流量、残存負荷量等を用いて流出負荷量を予測するモデルとして土研モデル⁶⁾などがあるが、一般に、流域の地形や河道の形状を流域全体にわたって把握することは困難であることから、水文流出モデルや汚濁物流出モデルは、多くの場合概念的かつパラメトリックな特性を持ったものにならないを得ない。流域を巨視的に捉える水文流出モデルの一つとして、菅原⁷⁾は、タンクモデル(以下「流量タンクモデル」とする)を構築し、後に海老瀬⁸⁾や奥川⁹⁾らは、流量タンクモデルによる予測流量をL-Q式に適用して汚濁物流出負荷量の予測を行っている。これに対して筆者らは、流量タンクモ

デルの中に汚濁物の流出機構を付加した汚濁物流出モデル（以下「水質タンクモデル」とする）を構築し、流域特性が異なる複数の河川における実測調査結果から、このモデルが汚濁物流出の再現性に優れていることを確認してきた¹⁰⁾。

そこで本研究では、水質タンクモデルを用いた汚濁物流出の数値シミュレーションを行うことにより、渇水時における汚濁物の堆積・流出挙動を定量的に予測するとともに、水源水質保全のための効率的な流域管理の方策を検討した。

2. 評価の方法

(1) 1994年渇水における観測降水量データの概要

検討の対象としたのは、京都地方気象台で1980年から1994年までの15年間に観測された降水量の時系列データである。この間の平均年降水量は1541.9mm/yであり、年降水量の最大値は2042.0mm/y（1980年）、最小値は880.5mm/y（1994年）また中間値（大きい方から8番目の年降水量）は1479.0mm/y（1986年）であった。ここでは、前述の目的から、これらのうち平水年および渇水年と考えられる1986年、1994年の降水量時系列データをそれぞれ用いた汚濁物流出の数値シミュレーションにより、渇水の影響評価を行った。表-1に1986年および1994年の降水量データの概要を示す。1994年の年降水量は1986年の60%しかなく、1年間を表のように梅雨期（期間Ⅱ）と夏期渇水期（期間Ⅲ）に相当する期間を考慮した4期に区分すると、特に1994年の期間Ⅲにおける降水量が1986年の同期の11%と記録的な少雨であることから、この渇水が夏期において大変著かったことが分かる。これに応じて、たとえば京都に近接する琵琶湖においては、水位が7月初めより次第に低下し、3次に及ぶ取水制限にも関わらず、1994年9月15日には、観測史上最低の基準水位マイナス1.23mを記録するに至った⁵⁾。

(2) 対象流域の概要

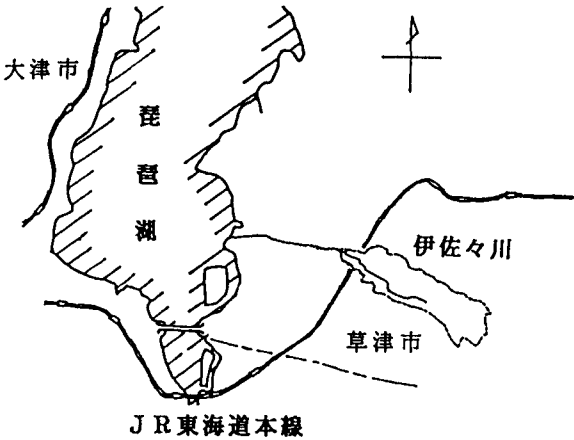
陸上で発生した汚濁物の多くは、渇水により陸上や河床、水路溜まり等に貯留・蓄積され、渇水明け、すなわち、ひとたび降雨があると、それらの堆積汚濁物が一気に受水域へと流出することが予想される。都市域では、汚濁物の自浄作用がほとんど期待できないため、こうした傾向が特に顕著であると推察される。そこで本研究では、都市域中小河川の伊佐々川を検討の対象流域とした。集水域の概要と特性を図-1に示す。伊佐々川は、琵琶湖へ東岸から流入しており、近年流域の都市化が著しい。土地利用は、上流部が山地と田畑、中流部が住宅地となっており、下流で滋賀県草津市の中心部を流れている。また、流域における下水道の排除方式は分流式である。

(3) 水質タンクモデルの概要¹⁰⁾

水質タンクモデルは、流量タンクモデルの各段タンクに設置したフルイABCにおいて、晴天時、雨天時を問わずタンクに供給された汚濁物がフルイBC上に堆積し、溶解成分や微細な懸濁成分から順次下側

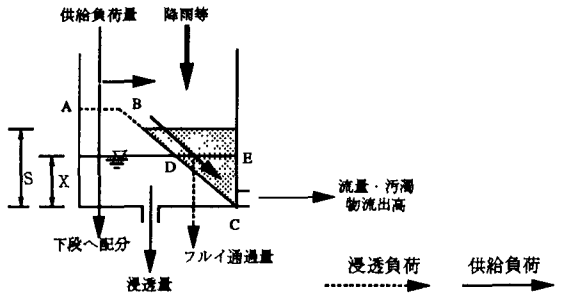
表-1 平水年(1986年)と渇水年(1994年)における降水量データの概要

年	期間	期間Ⅰ	期間Ⅱ	期間Ⅲ	期間Ⅳ	期間Ⅰ～Ⅳ
		01/01 ～03/31	04/01 ～07/09	07/10 ～09/15	09/16 ～12/31	01/01 ～12/31
1986	日数(日)	90	100	68	107	365
	晴天日(日)	68	61	44	71	244
	降水日(日)	22	39	24	36	121
	降水量(mm)	196.5	655.0	419.0	208.5	1479.0
1994	晴天日(日)	63	64	58	82	267
	降水日(日)	27	36	10	25	98
	降水量(mm)	157.5	435.5	47.0	240.5	880.5



流域面積 (km ²)	土地利用 (%)				流域人口 (千人)	下水道面 積整備率 (%)
	市街地	田	畑	山林		
3.93	49.82	27.80	8.42	13.95	9.0	65.4

図-1 対象流域の概要



連結構造	区分	水質タンク	
		ドライエリア	ウェットエリア
	上段上部	(自然域) 田・畑・山林 他	
	上段下部	(都市域) 路面・屋根 他	
	中段		河川・水路 他
	下段	ポイントソース	家庭排水 工場排水 他

図-2 水質タンクモデルの概念と各段タンクの意味

のタンクへ浸透していくものとして、図-2に示す汚濁物流出過程を仮定し、次の関係式で汚濁物流出量を表現している。

X ≤ S のとき

$$L = \alpha X \cdot \frac{1}{X} \int_0^X \beta B x^n dx$$

X > S のとき

$$L = \alpha X \cdot \frac{1}{X} \int_0^S \beta B x^n dx$$

ここに、L：汚濁物流出高、X：水位（貯留高）、S：汚濁物堆積高、 α ：流量タンク流出係数、 β ：水質タンク流出係数である。とりわけ、 αX は流量流出高、Bは、フルイの形状を水位方向のべき乗（ x^n ）で与えるときのフルイ上の汚濁物堆積量を堆積高に変換するための係数（汚濁物堆積高換算係数）を示す。

フルイ上の汚濁堆積物は、タンク内水位Xに応じて浸水している ΔCDE の部分が流出水とともに流出するが、同一水位の場合でも、汚濁物の堆積高Sが水位Xを下回るときには、希釈を生じて流出水質は小さくなる。タンクの連結構造は直列3段とし、供給負荷量を各段に分配した。上段タンクは主としてノンポイントソースに対応し、比較的大きな降雨で流出する上段上部が自然域に、小降雨でも一定の負荷流出がある上段下部が都市域にそれぞれ相当する。降雨時に上段からの浸透分が供給される中段タンクは、ウェットエリアに対応し、常に一定量の負荷流出がある下段はポイントソースに対応する。これにより、汚濁物の各発生源における現存量の評価がある程度可能となる。モデルのパラメータには、既報¹⁰⁾において何回かの試行計算により定めた値を用いるものとし、その際のモデルの適合性についても、既に一定の再現性を有することが確認されている¹⁰⁾。

(4) シミュレーションの方法

本研究では、計算の時間ステップは30分とし、2(1)に示した降水量の時系列データを用いた年間汚濁物流出シミュレーションを行った。シミュレーションでは、まず1986年（平水年）の降水量時系列データを用いた計算を繰り返して、水質タンクモデルにおける堆積高の初期設定値による影響が無視できるようにしたのち、後述するシナリオ（Case-1～Case-7）に則った降水量時系列データを入力することにより、それぞれシミュレーション解析を試みた。なお、タンクへの汚濁物の供給は、既報¹⁰⁾と同様、流域における年間発生負荷量を計算時間ステップ間隔に等分して行うものとし、この量はいずれのシナリオにおいても一定とした。対象とした水質項目は、SSおよび懸濁性(P)・溶解性(S)のCOD、T-N、T-Pである。

3. 水質タンクモデルによる1994年渇水のシミュレーション解析

(1) 年間シミュレーションの結果

表-2に示すシナリオで1年間の流出シミュレーションを行い、Case-1（平水年）とCase-2（渇水年）を比較検討した。流出シミュレーションの結果を経時変動図にして、図-3(1)、(2)に示す。降雨に伴う流量変動に応じて、汚濁物の断続的な流出が繰り返されていることが確認できる。これら汚濁物の流出源の構成を検討するため、年間流出シミュレーションの結果について、流出孔別の流出流量・負荷量をまとめたのが図-4である。Case-1（平水年）に比べてCase-2（渇水年）は、降雨による直接流出期間が短いため、流量をはじめとするほとんどの項目

表-2 シナリオ一覧 (Case-1, Case-2)

シナリオ	シミュレーション 期間	降水量 データ
Case-1	1年間	1986年
Case-2		1994年

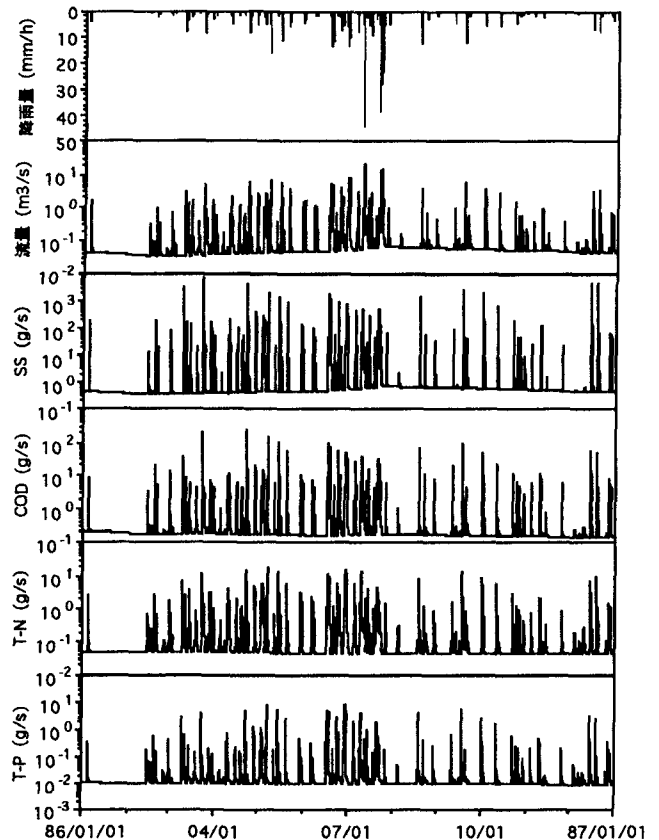


図-3(1) 汚濁物流出シミュレーションの結果 (Case-1)

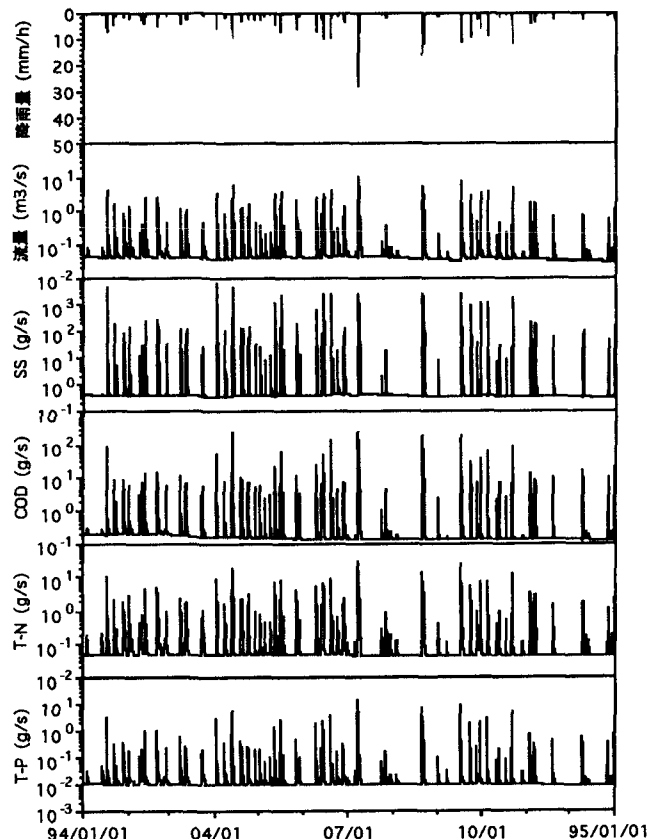
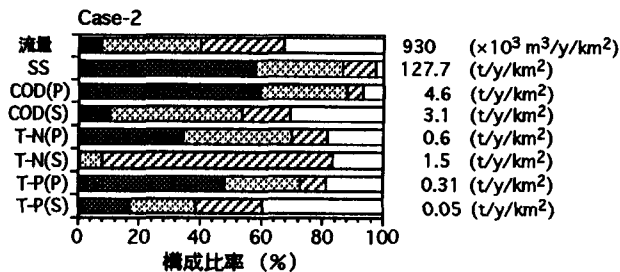
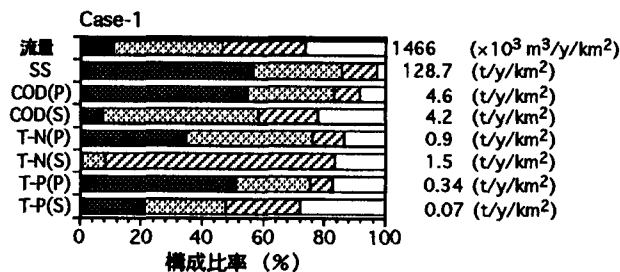


図-3(2) 汚濁物流出シミュレーションの結果 (Case-2)



■ 上段上部 ■ 上段下部 ▨ 中段 □ 下段

図-4 流出孔別年間流出流量・負荷量の構成 (Case-1, Case-2)

表-3 期間別流出流量・負荷量 (Case-1, Case-2)

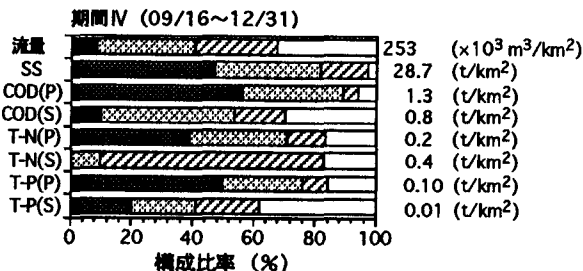
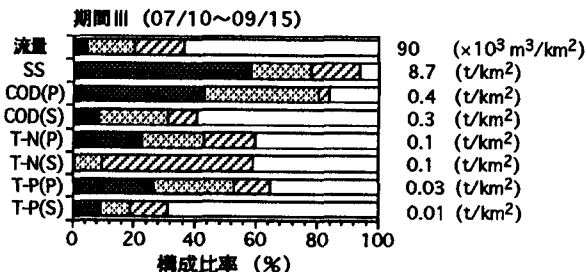
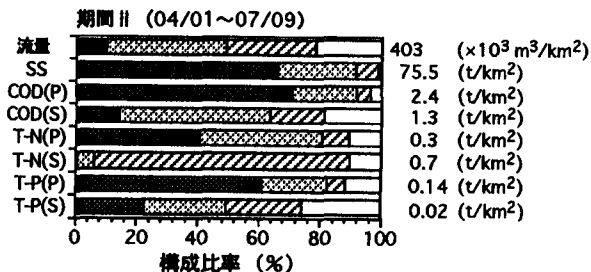
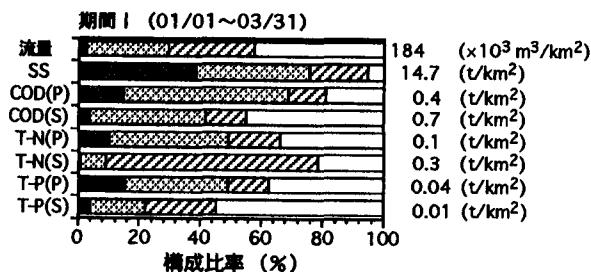
シナリオ	期 間	期間Ⅰ	期間Ⅱ	期間Ⅲ	期間Ⅳ	期間Ⅰ～Ⅳ
		01/01 ～03/31	04/01 ～07/09	07/10 ～09/15	09/16 ～12/31	01/01 ～12/31
Case-1 (1986年)	降水量(mm) (%)	196.5 100	655.0 100	419.0 100	208.5 100	1479.0 100
	流量($\text{m}^3/\text{d}/\text{km}^2$) (%)	2339.5 100	5776.7 100	6094.5 100	2463.8 100	4017.2 100
	SS ($\text{kg}/\text{d}/\text{km}^2$) (%)	401.3 100	566.9 100	156.3 100	236.2 100	352.6 100
	COD($\text{kg}/\text{d}/\text{km}^2$) (%)	18.0 100	43.5 100	20.2 100	14.0 100	24.2 100
	T-N($\text{kg}/\text{d}/\text{km}^2$) (%)	5.3 100	10.4 100	4.6 100	4.8 100	6.4 100
	T-P($\text{kg}/\text{d}/\text{km}^2$) (%)	0.8 100	2.0 100	1.0 100	0.7 100	1.1 100
Case-2 (1994年)	降水量(mm) (%)	157.5 80	435.5 66	47.0 11	240.5 115	880.5 60
	流量($\text{m}^3/\text{d}/\text{km}^2$) (%)	2043.5 87	4031.1 70	1320.0 22	2368.7 96	2548.6 63
	SS ($\text{kg}/\text{d}/\text{km}^2$) (%)	163.4 41	754.9 133	128.6 82	268.3 114	349.7 99
	COD($\text{kg}/\text{d}/\text{km}^2$) (%)	12.1 67	38.0 87	9.0 45	20.0 143	20.9 87
	T-N($\text{kg}/\text{d}/\text{km}^2$) (%)	4.2 80	9.7 94	2.4 52	5.7 120	5.8 91
	T-P($\text{kg}/\text{d}/\text{km}^2$) (%)	0.6 74	1.6 80	0.5 54	1.1 147	1.0 87

下段: Case-1 (1986年) の同期間に対する比率

で上段タンクから流出する比率が小さくなっているが、SSとCOD(P)では、逆に上段タンク流出分の比率がわずかながら大きくなっており、渇水により特にノンポイントソースから流出する懸濁性負荷が顕在化していることがうかがえる。

(2) 渇水期における汚濁物の流出挙動の評価

シミュレーションの結果を、さきに区分した期間別の平均流出量に整理して表-3に示す。Case-2における年降水量が、Case-1の60%であったのに対して、Case-2における年間流出負荷量(期間Ⅰ～Ⅳ)は、Case-1の87～99%となっており、年間流出負荷量に降水依存性はほとんど認められない。しかし、渇水期(期間Ⅲ)における、Case-2の流出負荷量はCase-1



■ 上段上部 ■ 上段下部 ▨ 中段 □ 下段

図-5 流出孔別期間流出流量・負荷量の構成 (Case-2)

の45～82%となっており、汚濁物流出負荷量について少なからず渇水の影響があることが示されている。それに対して、渇水後の期間Ⅳでは、Case-1とCase-2の降水量にあまり差がないのに対して、Case-2の流出負荷量は、Case-1の114～147%と非常に高くなっている。これにより、渇水期(期間Ⅲ)に汚濁物の堆積が進行した流域は非常にクリティカルな状態にあり、こうした渇水後の降雨によって、多量の汚濁物が受水域へ掃流されていたことが分かる。図-5は、Case-2(渇水年)の流出孔別流出流量・負荷量を期間別に整理したものである。いずれの項目についても、上段タンクからの流出成分の比率は、渇水期(期間Ⅲ)で小さく、梅雨期(期間Ⅱ)や渇水明け(期間Ⅳ)で大きくなっている。この傾向は、溶解成分に比べて懸濁成分で顕著であり、ここでも降雨の少ない渇水期にドライエリアに堆積した汚濁物が、その後の降雨により一気に公共用水域へと流出していたことが示されている。

(3) 渇水直後における汚濁物流出負荷量の検討

1994年(Case-2)において、渇水後最初のまとま

表-4 シナリオ一覧 (Case-2～Case-7)

シナリオ	降水量データ	
	94/01/01～ 09/16 2:00	94/09/16 2:00～14:00
Case-2	1994年	75.0
Case-3		5.0
Case-4		10.0
Case-5		30.0
Case-6		100.0
Case-7		200.0

った降雨は9月16日（期間Ⅳ）にあった。ここでは、こうした渇水直後の降雨に着目して、1994年9月16日の降雨量について、表-4に示すシナリオで流出シミュレーションを行い、渇水直後の流出汚濁負荷量を、降雨規模の違いにより比較検討した。シミュレーションの結果を図-6、表-5にそれぞれ示す。Case-2における期間Ⅳの総流出負荷量と、この9月16日の降雨による流出負荷量とを比較すると、長期に及んだ渇水直後のこの1降雨で、期間Ⅳにおける流出負荷量の実に30～50%もが流出しており、渇水期に流域に堆積した汚濁物の大部分が、この渇水直後の1降雨によって流出していたことが分かる。渇水直後の降雨量をCase-2～Case-7のように変化させた場合、いずれの水質項目についても、Case-3、4、5に比べてCase-2、6、7の流出負荷量は格段に大きく、降雨量50mm程度を境にして汚濁物の流出構造が異なっていることがうかがえる。特に、Case-2、6、7については、シナリオ間の降雨量の差ほどには、SS、COD負荷量に差がなく、渇水期における堆積物のほとんどが、Case-2規模の1降雨で流出しつくしてしまうことが分かる。一方、T-NとT-Pは、降雨量の増加に応じて流出負荷量も増加しており、こうした渇水直後の1降雨にとどまらず比較的長期間に及んで渇水の影響が現れていたことが推察できる。

水質タンクモデルでは、流域内の汚濁ポテンシャルをタンク内の汚濁物堆積高として表現している。Case-2における各段タンク内水位（貯留高）とCOD(P)堆積高の経時変化を降雨量・流出負荷量とともに図-7に示す。ドライエリアに相当する上段タンクでは、渇水期に蓄積された汚濁物のほとんどが、この降雨により掃流されており、逆にウエットエリアに相当する中段タンクでの汚濁ポテンシャルは、あまり変化していない。特に、都市域ノンポイントソースに相当する上段下部における堆積高は、この降雨によってほとんどなくなっており、こうした流出しやすい性状の都市域ノンポイント負荷の流出管理が特に渇水期には重要となることが分かる。

図-8は、Case-2のこの降雨について、流出孔別の流出流量・負荷量を示したものである。上流の自然域からウエットエリアを経由して中間流出成分として流出してくるT-N(S)を除くと、他の水質項目では上段タンクからの流出分が全流出分の78～98%を占めており、また懸濁性負荷については、その中でも特に上段上部流出分の占める比率が大きくなっている。渇水後の降雨においては、ノンポイントソースからの流出負荷量、その中でも特に都市域ノンポイントソースから流出する懸濁性負荷量が非常に卓越していることが示されている。

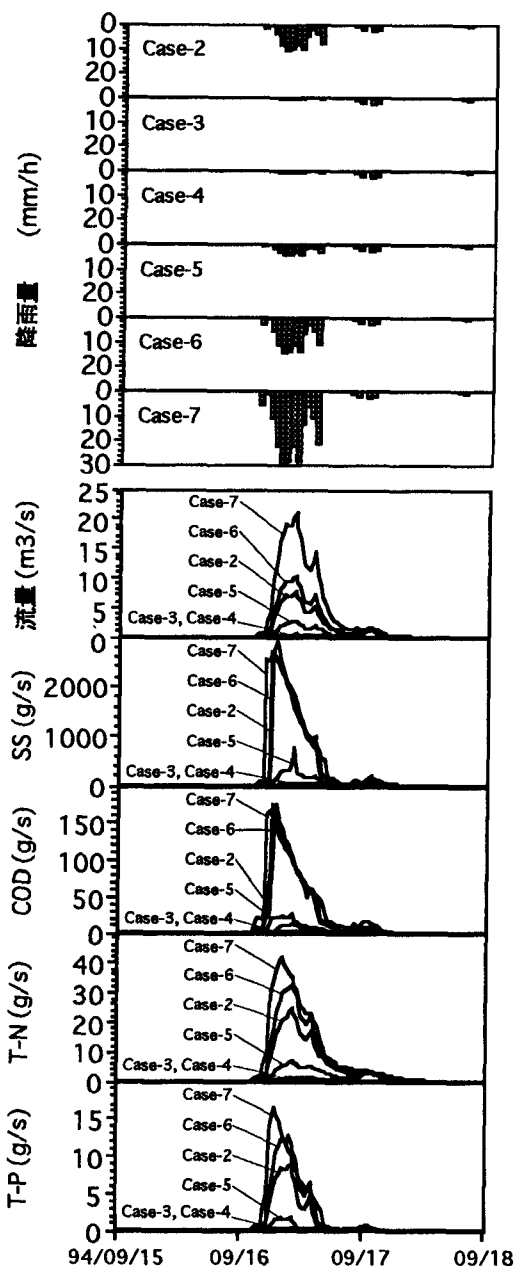


図-6 渇水直後における汚濁物流出シミュレーションの結果 (Case-2～Case-7)

表-5 渇水直後の降雨時流出負荷量の評価 (Case-2～Case-7)

シナリオ	Case-2	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6	Case-7
期 間	期間Ⅳ 94/09/16 ～12/31	94/09/16 02:00 ～ 20:30					
日 数	90	0.77					
降水量(mm)	240.5	75.0	5.0	10.0	30.0	100.0	200.0
流量 (10³m³/km²)	253.454	56.520	3.029	6.393	21.058	76.365	155.990
SS (t/km²)	28.705	14.243	0.111	0.701	2.572	16.178	18.504
COD (t/km²)	2.141	0.906	0.023	0.081	0.174	0.973	1.128
T-N (t/km²)	0.609	0.185	0.009	0.018	0.059	0.255	0.327
T-P (t/km²)	0.115	0.052	0.001	0.003	0.010	0.078	0.098

表-6 渇水時における汚濁物流出管理の方策

対象ステージ	方法	施策
発生源	負荷発生量の抑制	土地利用の規制
	諸活動の制限	都市社会活動の規制 汚濁含有物使用量の適正化 用排水のリサイクル利用 など
堆 積	清掃除去	路面清掃 雨水溝堆積物の除去 側溝、水路、河床堆積物の除去 など
	雨水流出の抑制	雨水の浸透 雨水の貯留 など
流 出	下水道負荷流出の抑制	合流式越流水の処理 分流式初期流出雨水の処理 など
	流出雨水・河川水の処理	瞬間接触酸化 一時貯留
		滞留沈殿 など

ける蓄積と河川への流出という2側面から定量的に検討した。その結果、渇水期における流域内の汚濁ポテンシャルは非常にクリティカルな状態にあることが示され、渇水による受水域への流入負荷インパクトを抑制するうえで、この期間の流域管理の重要性が明らかとなった。

謝辞：本研究の一部は、公益信託下水道振興基金（平成7，9年度）の助成を得て行われたものである。また、水質タンクモデルのプログラミングに際し、持田雅司氏（日本下水道事業団）の協力を得たことを記し謝意を表する。

参考文献

1) たとえば吉川秀夫，竹内邦良：渇水持続曲線の性質とその応用，土木学会論文報告集，Vol. 234，pp. 61～71，1975. 2.
2) たとえば國松孝男：渇水期における河川からの汚濁負荷の評価、昭和59年度琵琶湖異常渇水の影響に関する調査報告書，滋賀県琵琶湖研究所，pp. 15～29，1985.
3) 羽田守夫，佐藤悟，松本順一郎：雄物川の低水・渇水時における水質特性について，水質汚濁研究，Vol. 8，No. 9，pp. 51～59，1985. 9.
4) 平成6年渇水，土木学会誌，Vol. 80，No. 8，pp. 79～102，1995. 8.
5) たとえば'94渇水／琵琶湖の水位低下について（琵琶湖開発事業の効果と課題），水資源開発公団琵琶湖開発総合管理所，1995. 3.
6) 雨天時における合流式下水道改善に関する調査報告書，日本下水道協会，1980. 3.
7) 菅原正巳：流出解析法，水文学講座7，共立出版，1972.
8) 海老瀬潜一，宗宮功，平野良雄：タンクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析，用水と排水，Vol. 21，No. 12，pp. 46～56，1979. 12.
9) 奥川光治，宗宮功：数値モデルによる富栄養化のシミュレーション解析，土木学会論文報告集，No. 337，pp. 119～128，1983. 9.
10) たとえば市木敦之，山田淳，持田雅司：都市域中小河川における水質タンクモデルの適合性に関する研究，水工学論文集，Vol. 39，pp. 229～235，1995. 3.

(1997. 9. 30受付)

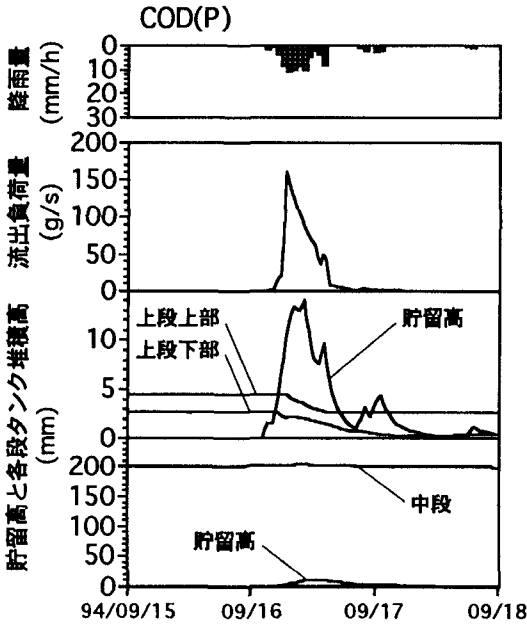


図-7 渇水直後の降雨時タンク内部の状態変化 (Case-2：COD(P))

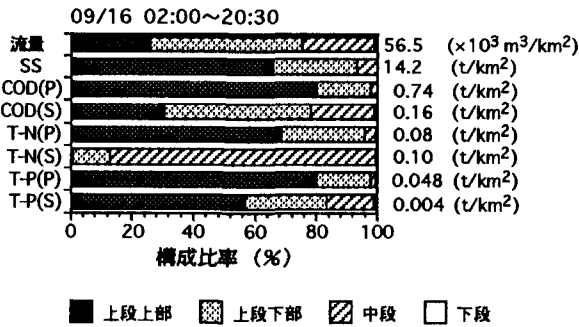


図-8 渇水直後の降雨における流出孔別流出負荷量の構成 (Case-2 94/09/16 02:00～20:30)

4. 渇水時における汚濁物流出管理の方策

渇水期には、流域内の汚濁ポテンシャルが非常に高く、かつその後の降雨により、特異な汚濁物流出特性を示すため、こうした汚濁物の性状を考慮した合理的な汚濁物流出管理の方策を検討する必要がある。表-6は、汚濁物流出管理の方策について対象とするステージを発生源と堆積、流出に区分してまとめたものである。上述の汚濁物流出特性を考慮して議論を渇水時に特化して行う場合、堆積・流出段階の管理施策が重要となるが、特に都市域における堆積物の清掃除去や降雨時流出水の貯留・浸透、直接処理などの方策を、流域特性や気象状況に応じて柔軟に使い分けることにより、合理的な汚濁物流出管理が行えるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、1994年の異常渇水による影響について、水質タンクモデルを用いて、汚濁物の流域にお