

1. はじめに

現在水域の水質計測は場所的にも時間的にも十分ではなく、汚濁物質の流出のメカニズムが解析されるには至っていない。汚濁負荷流出を追跡し解析することによって、都市がもつ河川のあり方を研究し、対象としている対策や施設の効果について正しく、そしてわかりやすく示す必要がある。合流式下水道からの汚濁負荷の流出は、降雨時の雨水の流出と密接に関係している。降雨時の面源負荷も含め河川中の汚濁量変化は降雨に起因している事が大きいと推測される。下水の質や量が都市河川中の汚濁負荷に大きな影響を与えるため、これら施設の導入や改良、今後の整備に反映させることができるような汚濁物質収支の解析がなされるべきである。本研究ではそのための基礎的段階として以下の検討を行った。はじめに降雨による雨水流出量が河川中の汚濁物質量の変化に及ぼす影響に着目し、降雨と河川中の汚濁物質データの比較・考察を行う。その後、流域特性を加味した比較を行うため、流出解析から流出量を算定し、汚濁物質データと流出解析を組み合わせた感度分析を行い、新たな考察を加える。最後にモデル流域に初期雨水貯留施設を加え、その影響について検討する。

2. 降雨と水質データの比較検討

本研究では名古屋市を流れる都市河川山崎川、新川、天白川、堀川を対象とし、図-1 にその対象河川と観測所を示す。名古屋市環境局の水質データを基に汚濁負荷の基本特性の分析を行い、様々な視点からその関連を解析することとした。比較の種類は季節変化、水質項目間の相関関係、降雨との関係であり、1、DO 年変化 2、濁度-COD 3、濁度-全窒素 4、濁度-全磷 5、全窒素

一全磷 6、降雨-濁度 7、降雨-全窒素-全磷 8、降雨-DO-COD 9 降雨-COD の項目で比較を行った。降雨以外での比較も行い、ある程度相関が得られたものも存在したが、ここでは降雨と関係の強かった COD との関係について詳しく考察を加える。図-2 は堀川におけるある降雨時の降雨量、DO と COD の変化を示したものである。また、図-3 は降雨による COD の変化を各河川で比較したものである。降雨による影響が強くみられ、降雨によって COD が増大していることがわかる。また、降雨以外の要因によって受けている影響は半日周期で起きており、おそらく潮汐によるものと推測することができる。また堀川では降雨時に DO が減少しているのがわかる。さらに図-4 は堀川での降雨量と降雨による COD 増加量  $\Delta COD$  の相関図である。その算定方法は

$$\Delta COD = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} COD dt - A_{COD} \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$A_{COD} = \frac{1}{24} \int_{t_0-24}^{t_0} COD dt \quad (2)$$

で表される。

$t_0$ (hour) : 降雨開始時刻,  $\Delta t$ (hour): 降雨による影響を受けていると思われる時間を示している。堀川では相関係数 0.6 が得られ有意な相

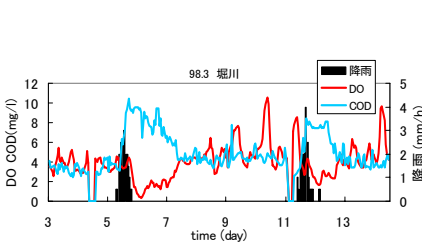


図-2 降雨-DO-COD

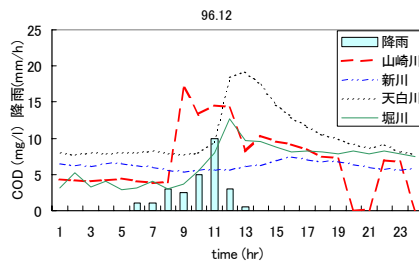


図-3 降雨-COD

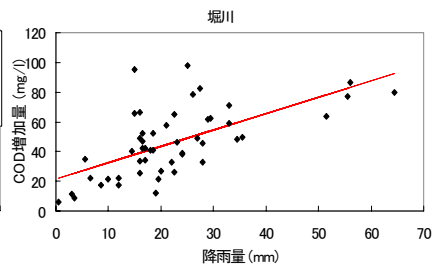


図-4 降雨-COD 増加量

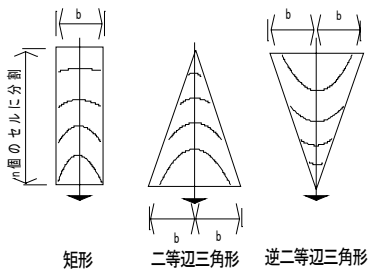


図-5 T-A 曲線法の種類

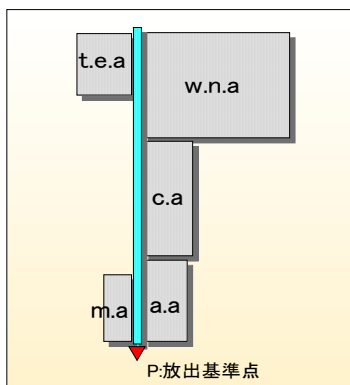


図-6 流域モデル

表-1 パラメータ

流域名	流入位置	流域中心座標		流域面積 h a	到達時間 (流達時間) min	不浸透域 %	初期損失 m	流出率	T-A曲線 種類
		X m	Y m						
w.n.a	1	1604.00	10237.00	1060.00	30	76.79	0.0006	0.58	1
t.e.a	2	529.00	9314.00	640.00	33	79.06	0.0006	0.58	1
c.a	3	107.00	6590.00	480.00	19	83.33	0.0006	0.58	1
a.a	4	398.00	3056.00	436.00	13	83.03	0.0006	0.58	1
m.a	5	512.00	2197.00	175.00	10	69.71	0.0006	0.58	1
放流口	16	0.00	0.00						

表-2 到達時間の算定

流域名	管径	延長	粗度係数	勾配	平均流速	流下時間	流入時間	到達時間
	mm			m				
w.n.a	600	1064.81	0.013	1.3	0.78	22.8	7.0	<b>29.8</b>
t.e.a	800	1564.81	0.013	1.5	1.02	25.6	7.0	<b>32.6</b>
c.a	850	691.37	0.013	1.2	0.95	12.1	7.0	<b>19.1</b>
a.a	850	364.28	0.013	1.6	1.09	5.6	7.0	<b>12.6</b>
m.a	850	164.67	0.013	1.7	1.12	2.5	7.0	<b>9.5</b>

表-3 浸透面積の算定

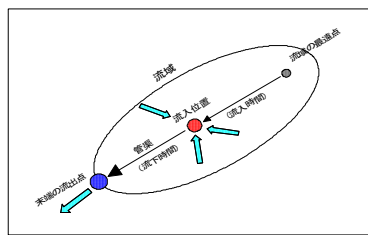


図-7 到達時間の概要

	堀川流域内			モデル区域	不浸透域 (%)
	面積 (km2)	浸透面積 (km2)	緑被面積/浸透施設		
北区	9.44	2.04	0.19	w.n.a	<b>76.79</b>
西区	1.16	0.21	0.02	t.e.a	<b>79.06</b>
千種区	2.98	0.75	0.06		
東区	3.42	0.46	0.07	c.a	<b>83.33</b>
中区	4.80	0.70	0.10		
熱田区	4.36	0.65	0.09	a.a	<b>83.03</b>
港区	1.75	0.49	0.04	m.a	<b>69.71</b>
計	27.90	5.86			
浸透面積率: 21%					

関があることがわかった。降雨による COD 増加量の相関は流域や河川ごとに異なっており、簡単な比例関係で表すことはできないが、ある程度の降雨量があると増加量も大きな数値を示している。短時間でかつ大きな降雨が COD に与える影響は大きく、他の要素よりも変化が起こりやすかった。反対に長時間でかつ小さな降雨が COD に与える影響は小さかった。

### 3. 降雨による COD 流出解析

水質観測所によって COD の濃度は得られているが、降雨による負荷量の総量を知るためには河川流量が必要である。しかし、堀川では流量が計測されていないため、計算によって流量を推定することとした。降雨によって COD が河川へ流出する現象について堀川を対象河川として汎用下水道流出解析ソフト MOUSE を用いてシミュレーションを行う。MOUSE では都市排水ネットワークを流域（表面流出モデル）、管路ネットワーク（管内水理モデル）に分けそれぞれで各パラメータを決定し流出解析を行っている。用いたパラメータを表-1 に示す。表面流出に用いた解析方法は T-A 曲線法である。これは、降雨が始まってから下水流入口へ流入するまでの時間（流達時間）が等しい領域を図-5 のように求め、その時間 T 内に流入する面積 A との関係を用いて流出量を計算する

方法である。本研究では図-5 の矩形領域を用いて、対象流域である堀川を図-6 の流域モデルに設定し適用した。到達時間の算出に関して表-2 に示す。算定方法は雨水が管渠内を満管で流下するとし、マンニング式により流域の流入位置から末端の流出点までの流下時間を計算し、さらにその値に最遠点から流入位置までの流入時間を加算した数値を用いる。図-7 にその概要を示す。平均流速  $v$ (m/s) の決定には等流式のマンニング式(1)を管路に拡張して用いた。

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{I_e} \quad (3)$$

マンニングの粗度係数は一律 0.013、径深 R は平均管径から算出し、マンニング式(1)に代入する。これにより得られた平均流速  $v$ (m/s) と流出点までの管渠の延長を用いて、流下時間を算出する。最後に流入時間を加え、到達時間を決定する。不浸透域については次式により算定し、その結果を表-3 に示す。

$$\text{不浸透域(\%)} = 100 - \frac{\{\text{緑被面積}(\text{km}^2) + \text{浸透施設}(\text{km}^2)\}}{\text{面積}(\text{km}^2)} \times 100 \quad (4)$$

降雨時の流出率（2次流出分は含まない）は、過去に行われた流出試験地の流量測定結果をもとに得られた値を用いた。なお、年間の代表降雨は最近 10 年間の平均雨量に

最も近い平成9年のデータを用いており、年間総降雨量と年間総流出高より年間の流出率が次式で計算される。

$$\text{流出率} = \text{総流出高} / \text{総雨量} \quad (5)$$

各パラメータを決定した後、対象降雨を選定する。今回は初めに比較した降雨と水質データによって相関が得られた11ケースの実降雨を用いた。流出解析の結果の一例を図-8に示す。流量ハイドログラフは下流端の地点Pにおけるものである。この降雨は総雨量16mm、時間最大雨量7.5mm、継続時間6時間であり、結果としてピーク流量45m<sup>3</sup>/sの流出となることがわかる。MOUSEによる管渠の計算においては潮汐などの下流条件が設定されていないため水位の比較はできないが、この流量は実際の流量増加分とみなすことができる。図にはこの降雨に対応したCODの濃度変化を示している。この結果を用いて降雨によるCOD総流出量を推定する。まず降雨時流出水の平均CODが38.93(mg/l)と推定されていることから、この値を総流出量に乗じてCOD総流出量を計算する。次に、実測されたCODに流出ハイドログラフを掛け合わせて積分することによりCODが計算される。この結果の一雨ごとのCOD流出量を示したのが図-9である。ここで一定濃度を仮定した総流出量と水質データから算出したCOD流出量を比較したのが図-10である。河川中の水質が降雨によって影響を受けていると思われる期間の水質データから算出したCOD流出量を、データ採取地点での

COD通過量と仮定するならば、COD総流出量に対してそのCOD通過量は1/5程度ということになる。降雨がすべて河川を流下していると仮定し、流出CODの平均水質が妥当であるとするならば、通過していない残りのCODは河川中に堆積したか、または雨水と潮汐による稀釈効果の可能性が示唆された。しかし、これを確認するにはより詳細なデータが必要である。実際には新堀川からの流出量が計算では含まれており、堀川だけの負荷量はさらに少ないはずである。これらのこと踏まえると推定値はCOD通過量としての妥当な値とは言えず、水質データから流出量の算定はできないということが示された。

#### 4. 貯留施設が都市河川汚濁負荷に与える影響

次に施設によるCOD負荷軽減効果を提示するため、モデルへ貯留施設の組み込みを行った。特に汚濁負荷流出特性であるファーストフラッシュの貯留について検討を行った。

4.1 COD流出波形について 先の流出解析においてCOD流出量を算定するために流出COD平均水質38.93(mg/l)という一律の値を用いた。ここではこの一定値である平均水質を固定し、ファーストフラッシュの影響を考慮した2パターンのCOD流出波形を作成した。流出波形には2パターンの波形を作成し、それぞれにおいて先に行った解析でのCOD流出量と比較することにより妥当性の検討を行った。作成時の判断材料として使用し

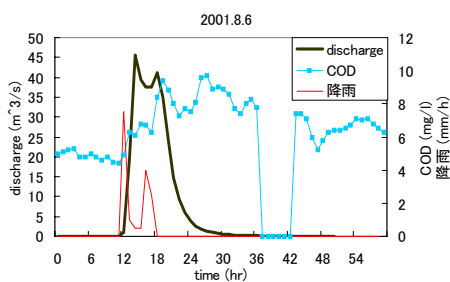


図-8 流出ハイドログラフ

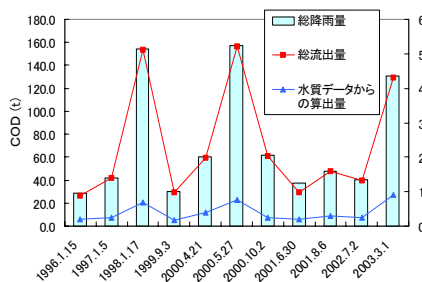


図-9 COD流出量推定値

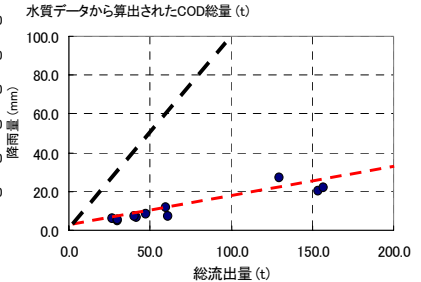


図-10 COD流出量推定値間関係

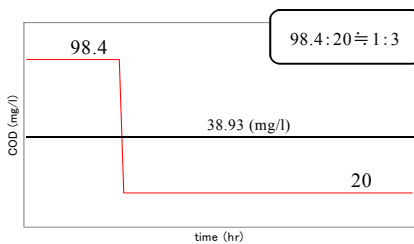


図-11 直線流出波形

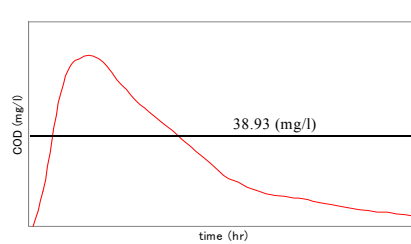


図-12 曲線流出波形

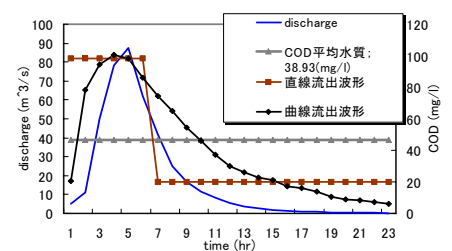


図-13 ハイドログラフと流出波形

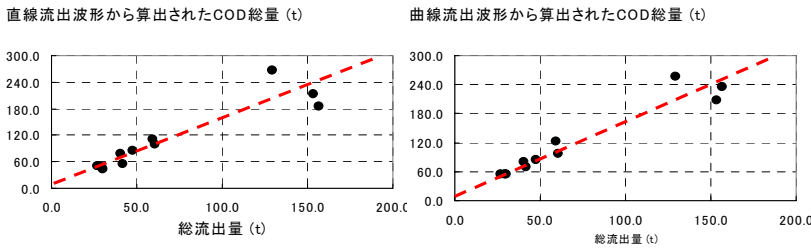


図-14 流出波形を用いた COD 流出量の相関図

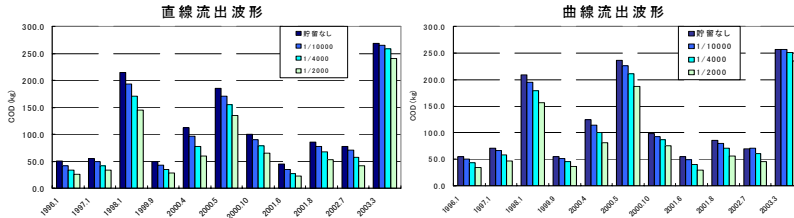


図-16 解析結果

たデータは、名古屋市上下水道局が新堀橋南側吐口で採取した雨水吐きのデータである。パターン 1 は平均水質を 2 つ決めその値を時間により変化させる 2 段階設定の直線流出波形で、パターン 2 は時間ごとにその値が変化する曲線流出波形である。それぞれを図-11, 12 に示す。解析結果の流出ハイドログラフと流出波形の時間関係を図-13 に示す。図-14 の解析結果から流出波形での COD 流出量は一律平均水質を与えた計算よりも多くなることが示された。これにより COD 流出量が流出 COD 平均水質以外の関数で表現できるとして、以降の解析においてファーストフラッシュを加えた解析を行った。

**4.2 結果と考察** 流出解析の結果と COD 流出波形を用いて COD 流出量の算出を行った。実際の都市河川である堀川流域の貯留施設による負荷削減効果についてこの COD 流出量を用いて比較検討を行う。対象とする降雨はこれまでと同様の降雨 11 ケースである。貯留施設は面積割合である 1/10000, 1/4000, 1/2000 で示し、堀川流域での雨水貯留施設の最大貯留能力はおよそ 34300 m<sup>3</sup>あり 1/4000 で同等程度となっている。図-15 は貯留施設を組み込んだ流出ハイドログラフと COD 流出波形を示す。解析結果として各降雨の COD 流出量の変化を図-16, COD 平均削減率を表-4 に示す。解析の結果、堀川流域での貯留施設の設置は COD に対する削減効果が大きいことがわかった。ファーストフラッシュと呼ばれる初期流出を出水初期に貯留することは都市河川の汚濁負荷軽減で重要であることが示された。そして貯留施設を有効に使用するには初期流出をいかに多く貯留するかということに

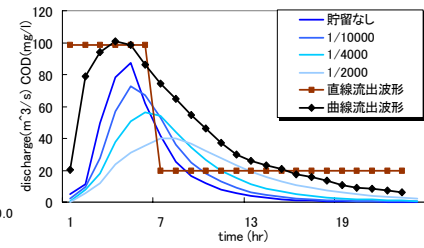


図-15 流出解析と流出波形

表-4 COD 平均削減率

	平均削減率 (%)		
	1/10000	1/4000	1/2000
有効貯留量(m <sup>3</sup> )	15691	39226	78453
直線流出波形	11.29	24.02	38.08
曲線流出波形	5.65	15.45	30.03

なる。また、直線、曲線流出波形の差に注目してみると、直線の場合は流出ピーク時間を遅らせることによって COD 流出の削減量が大きくなることがわかり、これが大きな差をもたらす原因であることが推測できる。曲線の場合は多少流出ピーク時間を遅らせても曲線流出波形はなだらかに推移しているため、大きな削減効果が得られないことが理解できる。実際の COD 流出波形は曲線流出波形に近いものである。このことからより多く COD を削減するためには、初期雨水の貯留だけではなく雨水をなだらかに、そして長い時間をかけて流出させることが重要であると示された。

## 5. おわりに

本研究では都市河川汚濁指標について基本特性を水質データより考察し、降雨による汚濁負荷流入についての基礎的検討を行った。また河川への流入対策として貯留施設を組み込んだ解析を行い、降雨時の流出特性であるファーストフラッシュの貯留による負荷削減効果について考察を行った。その結果、降雨による COD の増加量が低減され、初期雨水貯留による負荷削減効果が示された。今回の研究では COD に与える影響は降雨だけとして、かつ降雨全てが河川を流下していると想定して研究を進めた。そのため実際の河川としての再現はできていない部分が存在する。しかし複雑な構造を有するものを解析する場合には一つ一つの要因から生じることを詳しく調査していくことが重要であり、本研究は都市河川における汚濁負荷軽減対策を考えるうえで基礎的知見を与えるものである。