

雨天時下水の特性とその制御 — 雨天時合流式下水道の場合 —

建設省土木研究所 中村 栄一

1. 序

わが国では下水道普及率そのものが低調であったこと及び近代式下水道を先駆的に取り入れた多くの大都市が現在のように水質制御をその主たる目的としていたのではなく寧ろ雨水排除機能による浸水防止をその主たる目的としていたため、合流式下水道からの雨天時過剰越流水を放流先水域の水質汚濁に対して看過し得ない程重大な汚濁源として認識する人は少なかった。

現在においても、わが国全体から見れば人口普及率で25%前後に過ぎないわけであるから、多くの河川・湖沼・海域の水質汚濁要因の最たるものは下水道未整備の集落からの晴天時及び雨天時の排水であって、合流式下水道からの雨天時過剰越流水あるいは分流式下水道で整備された地域からの雨水流出水が放流先水域の重要な汚濁源として認識される例は少ないことに変わりはない。

しかしながら、例が少ないことと重要でないことはこの場合同義ではない。全国600以上の都市に対して、数のうえでは2%足らずの10大都市が、人口のうえではわが国全体の20%以上を占め、その市街地の大半が合流式下水道で整備が行われており、既に人口に対して65%前後の普及率を持っていることを考えると、合流式下水道からの雨天時過剰越流水が単にその地域だけの問題としてではなく、水質保全政策上の一つの国家的問題として認識されつつあることは事実である。

本論は、雨天時合流式下水道のこのような問題点を解決するための第一歩として、雨天時下水の特性を水量および負荷量の観点からまとめ若干の考察を付したものである。

2. 雨水流出特性

雨天時の汚濁負荷が雨水流によって流送されることを考えると、下水道が整備された地域における雨水流出特性を知っておく必要がある。

2.1. 雨水流出率

雨天時に下水管渠を流下してくる雨水流出水はほとんどが表面流出水であるが、この流出量と総降雨量との比率を雨水流出率と呼んでいる。一般に総降雨量が大きくなると雨水流出率も増大する傾向にある(図1)。しかしながら、雨水流出率を総降雨量をパラメーターとして考えてもそれほど精度的な向上は望めない。寧ろ不透透面積率(Imp)をそのまま雨水流出率に置き換えて雨水流出量を推定するほうが全体的なバラツキは少ないと思われる。図2は横軸に総降雨量、縦軸に雨水流出量をとって不透透面積率との比較を行ったものである。原点とプロットとを結ぶ直線の傾きが雨水流出率であるから、これを不透透面積率で置き換え得ることがわかる。

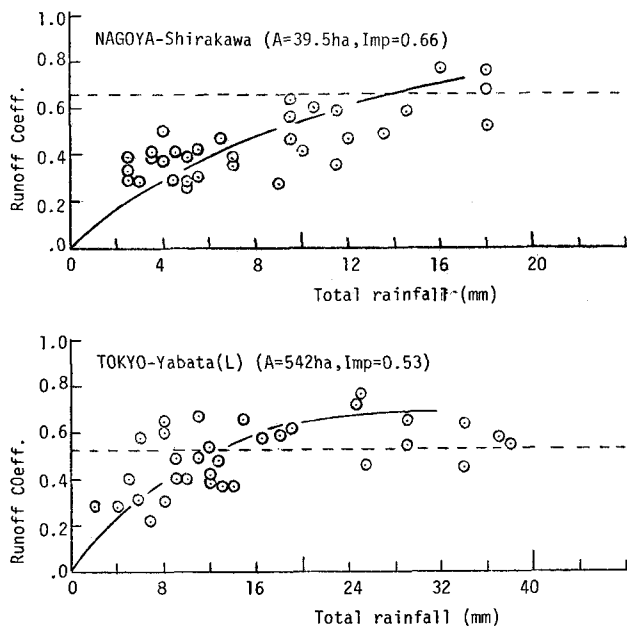


図1. 総降雨量と雨水流出率との関係

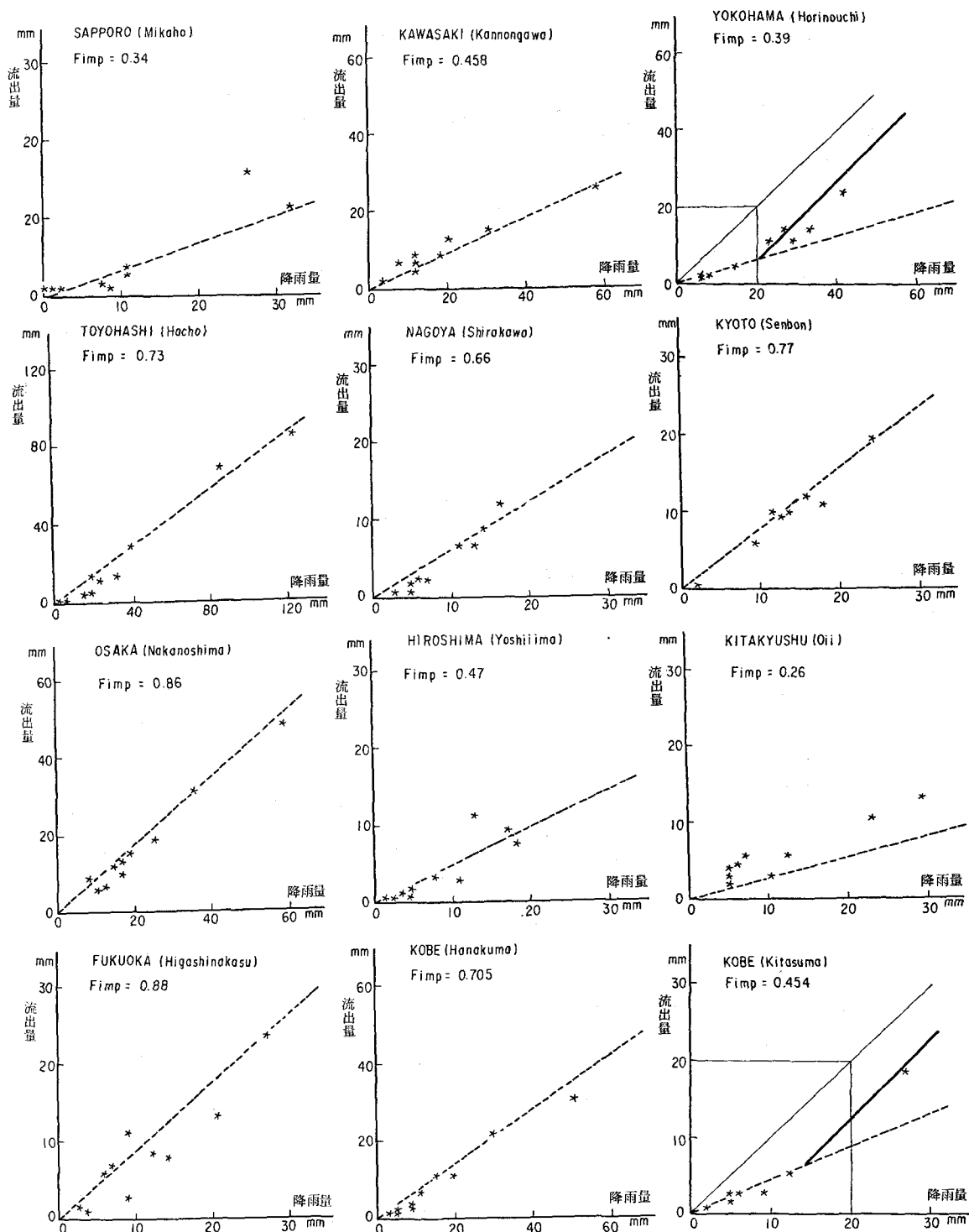


図2. 不透水面率別Kみた総降雨量と総流出量との関係

2.2. 流達時間

斜面からの流れをマニヤ型の流れとすれば、その流達時間 t_c は

$$t_c = \beta \cdot (L \cdot N / \sqrt{S})^{3/5} \cdot i_e^{-2/5} \quad (\text{min}) \quad ①$$

ただし、 L : 力学の斜面長(m), N : 等価粗度($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{sec}$), S : 斜面勾配, i_e : 有効降雨強度(mm/hr), β : 定数 $5/36^{0.4} = 6.988$ で与えられる。図3は流達時間と有効降雨強度との関係を見たものであるが、バラツキはあるものの上式の妥当性がうかがえる。

角屋等は多くの実験結果から、排水面積 A (km^2)を取り入れ

$$t_c = C \cdot A^{0.22} \cdot i_e^{-0.35} \quad ②$$

を提案しているが、この式に従った場合の C 値及び①式より求めた等価粗度の値の例を表1に示す。

2.3. 貯留量と流出量

下水管渠からの流出量は、従来の貯留函数法による流域内貯留量よりも寧ろ下水管内のみを対象とした動的貯留即ち管渠内貯留量と一意的な結びつきがあると思われる。従ってRRL法のような動的貯留を考慮した貯留法は妥当なものであり、事実検証計算の一致度も良い。管内貯留量は、計画降雨に対する流下時間が長いほど管渠延長も長いことを考えれば、一定の流出量に対する流下時間をパラメーターとして表すことが出来る。図4は懸案地点における流出量を30(mm/hr)としたときの貯留量 S_{30} (mm)と流下時間との関係について山口等が作成した図に若干のデータを加えたものであるが、流下時間 T_c を知ることによって次式から流下時間の関数で $S \sim Q$ 関係を表せることがわかる。

$$S_{30} = K \cdot (T_c)^{0.75} \quad (\text{mm}) \quad ③$$

$$S_{30} = 2.865 \cdot (T_c/10)^{0.75} \quad (\text{mm}) \quad ④$$

3. 汚濁負荷流出特性

3.1. 雨天時下水の平均的水質

雨天時下水の平均的な水質について晴天時下水との比較という点で知っておくことは、雨天時過剰流水の相対的インパクトを理解する上で有益であろう。表2はその一例であるが、これによると雨天時下水の平均水質は晴天時下水と比較して、BODで約7割、SBODで約4割、SSで約1/3倍、KN、TPとも約5割削減といえる。最大値でみると雨天時のBOD、SSは晴天時の最大値を上回ることが多いが、SBOD、KN、TPについてはそのような傾向はない。

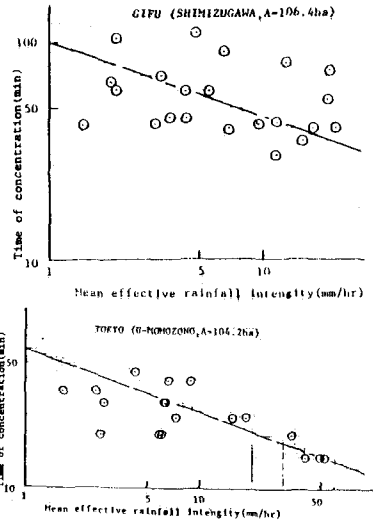


図3. 流達時間と有効降雨強度

表1. C値と等価粗度

排水区名	面積(km^2)	幹線長(m)	勾配(0/100)	C値	等価粗度($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{sec}$)
YABATA	5.420	3,380	2.7	55.2	0.0010
U-MOMO	1.042	1,910	3.6	59.4	0.0011
SHIMIZ	1.064	2,700	1.7	98.6	0.0013
SENNEN	0.812	2,100	1.6	73.3	0.0008
HACHO	0.684	700	1.2	59.8	0.0015
MIKAWA	0.443	1,780	2.7	119.6	0.0025

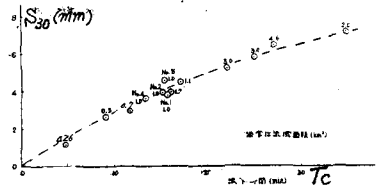


図4. 流下時間と S_{30} との関係

Table - 2. Quality of Combined Sewage

	BOD	SBOD	SS	KN	TP
DWF	39. -221. (134.3)	25. -119. (85.3)	46. -306. (151)	10.4-46.2 (24.5)	1.1-7.4 (4.0)
WWF					
470731	38. -353. (94.2)	15. - 63. (29.0)	94. -686. (340)	7.3-17.3 (11.3)	1.1-2.9 (1.8)
470909	69. -158. (104.6)	26. - 56. (37.1)	55. -214. (141)	13.2-14.7 (14.2)	2.2-2.8 (2.5)
471006	30. -240. (102.3)	19. - 66. (18.5)	92. -716. (251)	10.0-33.8 (14.6)	1.7-5.9 (2.8)
480721	62. -317. (121.7)	50. - 94. (65.3)	32. -788. (155)	14.4-36.1 (24.7)	2.5-7.2 (4.6)
480729	31. -147. (89.0)	10. - 45. (18.3)	11. -375. (87)	10.1-29.4 (9.8)	8-3.1 (1.2)
480801	17. -246. (88.6)	11. - 74. (19.4)	16. -1020 (221)	3.7-11.7 (4.3)	5-1.9 (0.54)
480804	20. -178. (70.1)	10. - 64. (8.8)	14. -475. (114)	*****	*****
480810	20. -245. (99.5)	24. - 88. (36.7)	21. -857. (182)	*****	*****
480824	25. -613. (93.0)	9. -238. (21.0)	39. -1768. (152)	*****	*****
481110	12. -368. (45.5)	4. -38. (9.3)	14. -680. (163)	2.4-26.7 (6.8)	2-3.1 (0.54)
WWF AVERAGE	11.6-613.4 (91.8)	3.9-38.4 (35.3)	11.0-1768.0 (175.0)	1.9-36.1 (12.2)	1.8-7.2 (1.97)

3. 2. 流出負荷量と流量

雨天時の流出負荷量は一般に流量と残存負荷量に支配されると考えられる。図5は雨水流出期間中を対象に流出負荷量と流量の関係をプロットしたものである。流出負荷量を L (g/s), 流量を Q (m³/s) として L を Q のみの関数として表そうとする場合には

$$L = K \cdot Q^n (Q - Q_c) \quad (5)$$

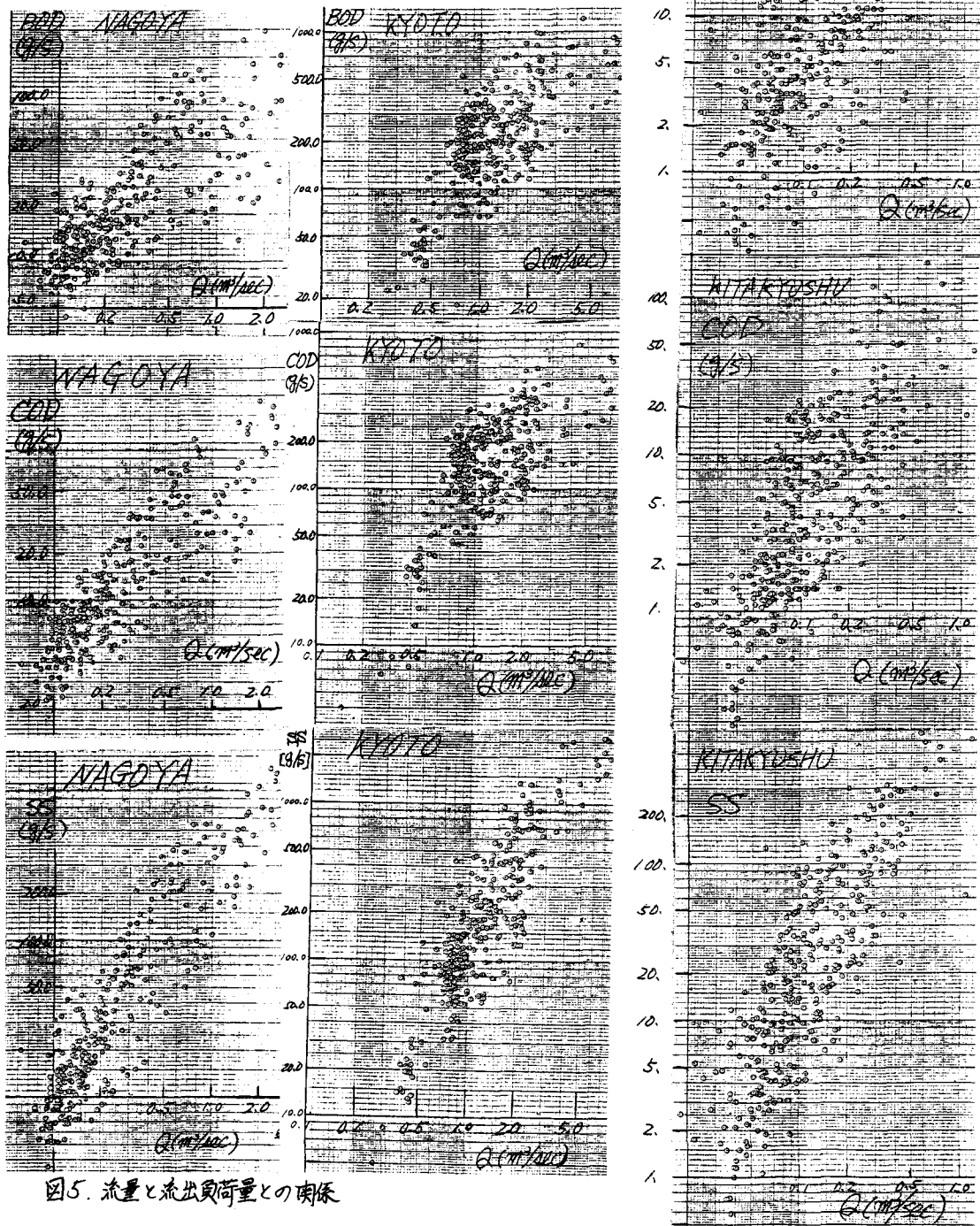


図5. 流量と流出負荷量との関係

という形が浮遊砂量を求める式と類似のものであり妥当であろう。しかし、流量と負荷量の間に比較的強い直線性が認められるSSKについても流量の増大期と減少期では異なるパスをとるときがあり(図6)、たとえ2つの場合についてK値を変えたとしても⑤式による予測には限界がある。Nの値は

$-0.4 < N_{BOD} < -0.1$; $-0.2 < N_{COD} < -0.1$; $0.2 < N_{SS} < 0.5$
程度であり、とくにK BODのN値は地域差が大きい。

3.3. 流出負荷量と残存負荷量

雨水流出における貯留と流出の関係が汚濁負荷の流出における残存負荷量と流出負荷量の関係と考えれば、残存負荷量の意味するところは容易に理解出来る。勿論、後者の場合には流出量というもう一つのパラメーターが関与していることは既に述べた通りである。河川における浮遊砂量を考える場

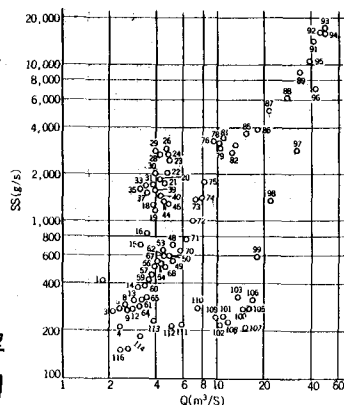


図6. 流量とSS負荷量

合には、残存砂量が無限大と

考えることも出来るが、下水管渠を対象に流出負荷量を考えるときは、残存負荷量はあ

る上限値を持った有限量として取り扱う必要がある(図7)。図8は横軸に累積雨水量、縦軸に累積流出負荷量(晴天時分を上回って出て来た負荷量の累積値)をとって両者の経時的関係をひき両者に求めたものである。曲線はすべて上に凸の形状をとっており、流出負荷量、従って残存負荷量

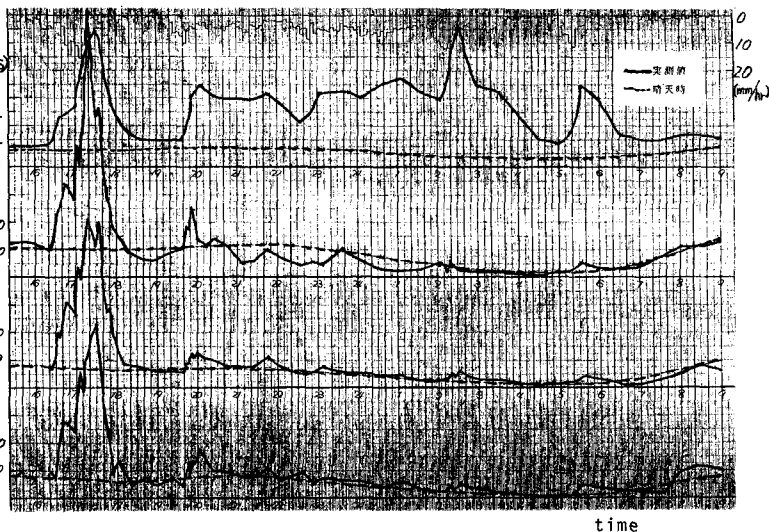


図7. 多重降雨時の流量と流出負荷量及び晴天時負荷量

に上限値が存在することがわかる。同じような雨水流出状況であっても先行降雨条件によって総流出負荷量が異なる。これは相互の初期残存負荷量が異なるために生ずるのであって次のように説明することが出来る。流出負荷量を L (kg/ha/h), 残存負荷量を P (kg/ha), 雨水流出量を i_e (mm/h), k (1/h)を定数とすると近似的に

$$L = k \cdot P \cdot i_e$$

と表わせる。一方、 P に関する連続式

$$dP/dt = i - L$$

において流入負荷量 i を無視すると総流出負荷量は

$$\int L = P_0 - P = P_0 \cdot (1 - \exp(-k \cdot \int i_e))$$

で表わされ、初期残存負荷量 P_0 と総雨水流出量 $\int i_e$ がひと雨による総流出負荷量の支配的なパラメーターになるとがわかる。

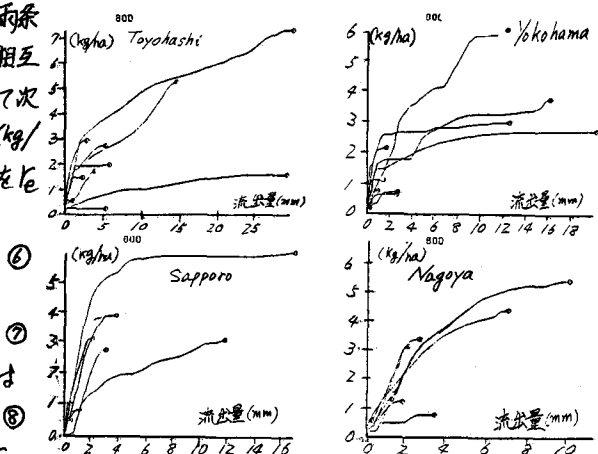


図8. 累積雨水流出量と累積流出負荷量の関係

初期残存負荷量 P_0 に先行降雨がどのように影響しているのかは必ずしも明確ではない。その理由は先行降雨によって流送された分の負荷量が、堆積地点においてどのように補給されているのか、即ち堆積負荷の回復現象が実際どのようなものになっているのか観測した例が少ないからである。図9は一つの路面をいくつかのブロックに分け、経時的に一つ一つのブロック上に堆積している負荷量を測定したものである。調査の性質上測定値にバラツキが出るのは止むを得まい。堆積負荷の回復曲線は上に凸の曲線を描き、ある一定の上限值に収束する傾向を持つ。

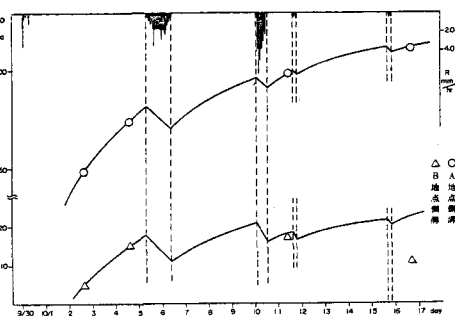


図9. 路面堆積負荷の回復

⑩式で示される負荷流出が生じたときに残存している負荷量 P は、

$$P = P_0 \cdot \exp(-k \cdot \int t_e) \quad (9)$$

で表わされるが、いま汚濁負荷の供給速度を i (kg/ha/hr) として長時間後の残存負荷量を P' とすれば

$$dP/dt = i \cdot (P_m - P') / P_m \quad (P_m: \text{残存負荷量のcapacity}) \quad (10)$$

によって P' の連続式が表わされる。補給量の積分値 $\int i dt = I$ (kg/ha) とおき、 $P'_0 = P = P_0 \cdot \exp(-k \cdot \int t_e)$ を使うと

$$P' = P_m \cdot [1 - (1 - \frac{P_0}{P_m} \cdot \exp(-k \cdot \int t_e)) \cdot \exp(-I/P_m)] \quad (11)$$

が長時間後の残存負荷量となる。 $P_0 = P_m$ の場合には

$$P' = P_m [1 - (1 - \exp(-k \cdot \int t_e)) \cdot \exp(-I/P_m)] \quad (12)$$

となる。従って先行降雨の影響は、従来が言われている先行降雨の流出量 $\int t_e$ 、先行晴天時間 t という水文要因の他に、残存負荷量のcapacity P_m 、負荷流出係数 k 、負荷供給速度 i などの様々のパラメーターを関与して表われ、地域的に差のあることがわかる。表3は下水管渠のBOD

Table.3 P_m (kg/ha) and i (kg/ha/hr)

について P_m および i をまとめたものである。BODの場合 $k=0.2 \sim 0.3$ (1/日) であるから $\int t_e = 20$ mm のとき k は初期残存量の98%以上が流出することになる。これに対して $i/P_m=0.1$ ならば半日で約70%、1日で91%、2日で約99%まで回復が図られる。 $i/P_m=0.05$ であっても、半日で54%、1日で70%、2日で91%、4日で99%までの回復が行われる。従ってわが国の場合 k は、BODについて言えば先行晴天日数の影響は高々5日まで、熱く程度でそれ以上晴天が続いても残存負荷量に及ぼす影響は皆無と言える。

	(ha)	P_m (kg/ha)	i (kg/ha/hr)	i/P_m
SA	44.33	6.0	0.504	.084
KA	35.13	9.0	0.758	.084
YO	22.09	6.0	0.692	.115
TO	68.37	7.5	0.892	.119
NA	39.5	6.0	0.633	.106
KY	148.49	25.0	3.217	.129
OS	45.5	15.0	0.875	.058
HI	215.14		0.321	
KI	57.6	8.0	0.054	.007
FU	17.61	16.0	4.217	.264

4. まとめ

雨天時合流式下水道の雨水および汚濁負荷の流出特性について述べたわけであるが、紙数の都合で制約の多くは触れることが出来なかった。図5あるいは図8から明らかなように、都市化による浸透域の減少は雨水流出量の強度的および総量的な増加をもたらす結果として汚濁負荷流出量の強度的・総量的な増加につながる。従って浸透域を確保することは、雨天時の汚濁対策の中で最も基本的な方法と言える。汚濁負荷の流出特性から、過剰越流水の一時的な貯留と貯留下水の処理の組み合わせは現実的で効果的な方法であり、設計法の確立が急がれる分野と思われる。また雨天時下水を直接処理するという方法は負荷の流出特性から考えると相当慎重にならざるを得ないであろう。

(参考文献) 山口等: 都市域における流出量調査第2,3報; 土技要vol.4-11, vol.15-7, P.S.Eagleson: Dynamic Hydrology McGraw Hill, 鳥居: 都市化と流出, 水工研修, 1974, 稲場: 雨天時下水の水量水質制御に関する研究, 京大工学論文, 1974 中村: 合流式下水道対策の検討, 下水道協会誌vol.15, No.123, 中村等: 合流式下水道対策の検討(訂正), 土木回生工論会