

## 合流式下水道における雨天時流出汚濁負荷量の推定法

北海道開発コンサルタント 正員 ○高畑征三郎  
日本下水道事業団                   〃 下川原拓也  
北海道大学                           〃 神山 桂一

## 〔1〕はじめに

合流式下水道において、雨天時汚濁物質による公共用水域の汚濁問題が叫ばれてから久しい。しかし、我国におけるその対策についての研究は未だ緒についたばかりと言え、実用的効果的な対策手法は今のところ見出されていないのが現状である。5、6年前からこの問題について活発に議論され始め、札幌市も含めた多くの都市で実態把握のための調査が続けられている。筆者らも昭和47年から50年まで札幌市琴似川排水区において雨天時下水の実測調査を行なった。当時、筆者は北海道大学工学部衛生工学科の助手であったが、現在では当研究室ではこの研究は続けられていない。そこで、この4年間に得られた知見について、この論文で総まとめをしておきたいと思う。実測を開始した最初の2年間は自動サンプラーの不備で満足なデータを得られなかったが、昭和49年から50年の2年間は約60事象のデータを得た。従って、ここで述べる知見はこの期間に得られたデータを基礎とする。

## 〔2〕研究の目的

合流式下水道の最大の問題点は、雨天時に晴天時汚水量の2～3倍を越えた下水が無処理のまま雨水吐室から放流され、公共用水域の水質汚染を生じさせているという点である。筆者の推定では、この無処理放流下水の年間BOD負荷量は、下水終末処理場放流水の年間BOD負荷総量に匹敵する量である。また、合流式下水道の場合、晴天時汚水量の1～2倍量は、簡易処理として最初沈殿池を通じたのみで放流されており、これによる公共用水域の汚濁問題も見のがせない。この問題解決の1方法として、合流式下水道の分流化が提唱されている。しかし、汚染は向も下水道の中にのみある訳でなく、都市全域に存在するものである。晴天時に、下水道も含めた都市全域に堆積沈積した汚染が雨によって運送され、下水道施設に集中し、それが公共用水域に放流される事により水質汚染問題が生じていることを認識せねばならない。汚水と雨水を別系統で集収し、汚水は処理場で処理し、雨水は直接河川へ放流するといった分流式に比べ、汚水も雨水も1つの系統で集める合流式の方が都市内の汚濁物質を制御しやすいといった考え方も十分通用する。現在、大都市を中心に多くの都市で合流式下水道が採用されており、これらすべてを分流化するには、財政的、技術的な多くの問題点がある。ともあれ、現状の合流式下水道には何らかの対策が講じられねばならない。

このように考えると、理想的な下水道システムとは、これら都市域に発生する汚濁負荷が公共用水域に流入することを最も効果的に除去できるシステムということになる。降雨の特性、発生する汚濁負荷量の特性等を十分に把握すれば、その中から合流式下水道に帰因する公共用水域の水質汚染に対し有効な対策が見出しうるはずである。対策としての基本的な考え方は、雨天時の激しい流量変動と負荷変動を吸収平坦化して、公共用水域への汚濁物質の流出量をできるだけ小さくおさえる事と言えよう。実際の対策としては、雨水沈殿池の設置、雨水滞水池の設置、雨水吐室の弁效率の向上等が考えられる。上記の主旨にそって考えると、雨水滞水池が最も有望な手段となる。現在、横浜市、大阪市、広島市等で雨水滞水池の計画、建設がなされているが、これらの設計諸元の根拠は比較的乏しいものであると言える。雨水滞水池の最適設計を行なうには、雨天時流出下水の水質負荷変動の予測方法を確立すること不可欠であり、この研究の目的はこの事にある。そのためには、雨天時流出下水の実態把握から始めねばならない。

### [3] 雨天時流出下水の水量、水質調査

札幌市内琴似川排水区域のⅧ-4000系統の一部をモデル排水区域に選定し、下流部の観測点のマンホールの上部に、縦3m、横2.5m、高さ1.4mの観測室を設けた。観測室内には自動サンプラーおよび自記水位計を設置した。自動サンプラーは、市販のゼンマイ式の一定時間間隔(1hr)採水式のものを、下水の水位がある設定した高さに達すると作動し始め、かつ所要の時間間隔採水が可能のように改造したものである。また、排水区域内に1ヶ所自記雨量計を設置した。

図-1に対象とした排水区域の主要管網図を示す。図に示すように、当排水区域は縦約4km、横約1kmの南北方向に細長い形状をしており、最上流部は山地(区域外)で、その面積は全体の約17%を占めている。表-1に排水区域の概要を示す。当排水区域はこの3.4年の間に水質が急増し、水使用原単位の増大も相まって、昭和49年頃から晴天時平均汚水量が計画汚水量の $0.2m^3/s$ を越えている。

調査項目はPH、電気伝導度、汚濁指標としての $COD_{Cr}$ およびTOC、無機性汚濁指標としてのSSが主要なもので、時々、BOD、VSS、T-N、P等も分析した。

$COD_{Cr}$  vs. TOC、SS vs. 浊度の相関関係は非常に良好である事が解ったので、昭和50年度には $COD_{Cr}$ とSSは適時分析することとし、実験手間の比較的にかからないTOCおよび濁度を常時測定し、相関図から $COD_{Cr}$ およびSS値を求める事とした。

### [4] データの解析とその考察

#### (4-1) 晴天時水質

晴天時水質は雨天時流出水質を解析する上でその基礎となる。昭和49年度に2度、昭和50年度に3度の通日調査を行った。結果を表-2にまとめている。当排水区域は区域外排水区域として、山地を有しており、そのため5月には融雪による流出が影響して平均流量は他の値より大となった。しかし水質は比較的低い値を示し

ており、負荷量として見た場合、ほとんど差がないとみえる。また、10月のデータを見ると、昭和49年と50年とはほとんど差がないと言える。

表-1 調査対象とした排水区域概要

| 排水区分<br>No       | 用途<br>地域  | 面積<br>ha | 平均勾配(%)      |           |           |        | 総管渠長(m)*  |           | 水洗基数  |        |
|------------------|-----------|----------|--------------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|-------|--------|
|                  |           |          | 地盤           | 水 路       |           |        | φ300~600管 | φ700~800管 | (個)** | (個)*** |
|                  |           |          |              | φ300~600管 | φ700~800管 |        |           |           |       |        |
| ①                | 住宅        | 46.9     | 3            | 4.9       | 2.2       | 9.175  | 1.345     | 599       | 804   |        |
| ②                | 商業        | 98.4     | 10           | 7.4       | 3.7       | 10.662 | 2.745     | 745       | 908   |        |
| ③                | 住宅        | 129.6    | 15           | 7.7       | 3.0       | 10.480 | 3.260     | 762       | 963   |        |
| ④                | 区域外<br>山地 | 57.1     | 140          | —         | —         | —      | —         | —         | —     | —      |
| 合計 <sup>平均</sup> |           | 332.0    | 112<br>(区域外) | 6.8       | 3.1       | 30.317 | 7.350     | 2106      | 2675  |        |

\* S.49.3 現在

\*\* S.49.10 現在

\*\*\* S.50.3 現在

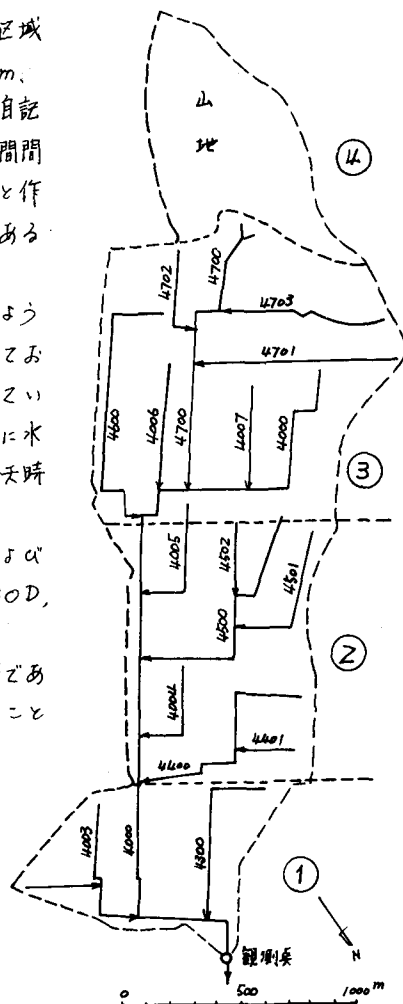


図-1 琴似川排水区域Ⅷ-4000系統

#### (4-2) 雨天時水質の諸特性

昭和49年5月～11月および昭和50年7月～11月の間に大小合せて約70事象が観測され、雨天時下水の流出特性を知る上で有用なデータが得られた。観測された全事象のデータをなめると、雨天時流出下水の水質の一般的傾向として次の事が言える。

i) ハイドログラフとインリュートグラフは全体的に相似形であるが、CODのピークはハイドログラフのピークに先行し、SSのピークはハイドログラフのそれと一致する傾向がある。ii) 流出下水の水質は先行晴天日数により極端に異なり、先行晴天日数が大きい程悪化となる。iii) ハイドログラフのピーク時を過ぎると、COD濃度は比較的早急に晴天時のそれに近づくが、SS濃度は長期にわたって高濃度が続く。iv) ハイドログラフの山が近接して複数回出現する場合、COD濃度のピークは最初の山付近に出現するが、SS濃度のピークはハイドログラフのピークに対応して出現する。この事はCOD成分の流出源は限られているのに対し、SS成分の流出源は無限に存在することを示す。v) COD濃度とSS濃度は電気伝導度と逆の相関関係にある。vi) CODとTOCとVSS、また、SSと浊度とは互に高い相関関係にある。vii) PHの変化はほとんどなく、7前後で晴天時下水のそれと同じである。

#### (4-3) 流量 vs. 汚濁負荷量の関係

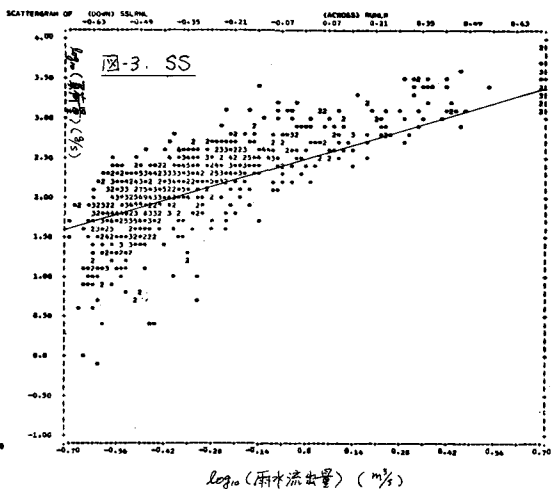
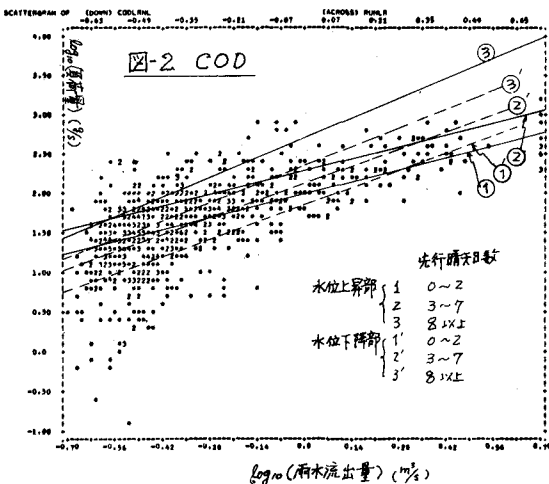
昭和49～50年に得られた全データについて、横軸を雨水流出量、縦軸を負荷量にやり、CODについてプロットしたものと図-2に、SSについてプロットしたものを図-3に示す。なお、縦軸の負荷量の値は観測値から晴天時の負荷量を差し引いた正味の負荷量の値である。また、同図には、先行晴天日数別、水位上昇下降期別の回帰直線を描いている。先行晴天日数の計算方法については問題もあるが、ここでは一応、晴天時流量の約2倍するあたり0.5 m³/s以上の大きさのピーク流量が生じた時より起算して日数計算を行なった。この図から次の事が言える。

i) 流出汚濁負荷量は流量と  $Q_s = KQ^n$  (ここで、 $Q_s$ : 流出汚濁負荷量、 $Q$ : 雨水流出量、 $K, n$ : 係数) で表現される傾向がある。ii) SSはCODより比較的良好な相関関係にある。iii) CODは先行晴天日数および水位上昇下降期別に表現すれば(1)式で表現される傾向を持つが、水位下降期では比較的良好な相関性が悪い。iv) SS

表-2 晴天時データのまとめ

計画汚水量 0.198 m³/sec

|                 | S 49.5.13~14 |       |       | S 49.10.17~18 |       |       | S 50.10.31~11.13 3回の3日間 |       |       |
|-----------------|--------------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|
|                 | Max          | Mean  | Min   | Max           | Mean  | Min   | Max                     | Mean  | Min   |
| 流量(m³/s)        | 0.307        | 0.271 | 0.231 | 0.248         | 0.207 | 0.167 | 0.260                   | 0.206 | 0.151 |
| PH              | 7.3          | —     | 6.8   | 7.3           | —     | 7.1   | 7.4                     | —     | 6.8   |
| 電気伝導度(μmhos/cm) | 338.5        | —     | 231.0 | 390.0         | —     | 251.0 | 428.0                   | —     | 238.5 |
| SS (PPM)        | 201.0        | 81.9  | 38.8  | 365.3         | 130.5 | 25.7  | 219.9                   | 60.5  | 5.4   |
| SS (%)          | 56.7         | 22.4  | 8.2   | 82.8          | 28.4  | 4.8   | 50.8                    | 12.7  | 1.0   |
| VSS (PPM)       | 65.3         | 39.0  | 15.1  | 215.3         | 62.6  | 7.0   | —                       | —     | —     |
| VSS (%)         | 20.1         | 10.9  | 3.5   | 48.6          | 13.7  | 1.2   | —                       | —     | —     |
| COD (PPM)       | 223.2        | 100.1 | 26.8  | 361.4         | 136.0 | 31.0  | 277.5                   | 131.3 | 18.4  |
| COD (%)         | 63.0         | 27.2  | 6.3   | 81.5          | 28.2  | 5.2   | 64.7                    | 27.5  | 3.1   |
| TOC (PPM)       | 113.5        | 57.4  | 10.1  | —             | —     | —     | —                       | —     | —     |
| TOC (%)         | 32.0         | 16.1  | 2.3   | —             | —     | —     | —                       | —     | —     |



流出負荷量は先行晴天日数に比較的關係なく、また、水位上昇部も下降部も同じ傾向を示す。iv). COD流出負荷量は雨水流出量が一定の場合、先行晴天日数が大きい程大きく、また先行晴天日数も一定の場合、水位上昇期の方が下降期より大きい。v). 最小自乗回帰式は表-3に示すとおりである。

次の理由により、CODについてはこの節で示したような雨水流出量の値から汚濁負荷量を推定することは不可能であると結論した。i) 先行晴天日数の算定方法とその普遍性。ii) ハイドログラフのピークが2個以上ある場合の水位上昇部と下降部とどこで区切るのが妥当かの判断が難しい。iii) 水位上昇部は比較的良好な相関があるが、下降部の相関性はうすい。

#### [5] 完全混合槽モデルによる流出COD負荷量の推定

前節に示した表現による流出COD負荷量の推定が不可能となると、雨天時の汚濁物質の流出機構を念頭ににおいて何らかの数式モデルを考えねばならない。雨天時における汚濁物質の概念的な流出機構は、晴天時に排水区域内(地表面、側溝、雨水汚水軒、下水管渠等)に沈殿堆積した汚濁物質が雨天時に掃流運搬される現象であると言える。ここでは、このような複雑な流出機構を思い切ってマクロにとらえ、排水区域(地表も下水管渠等も含め)を1つの槽におさかえた完全混合槽モデルを採用した。

実測データを検討すると、雨天時流出COD負荷量の特性に関し次の事が定性的に言える。i) 雨水流出量が同程度の場合でも、その事象が生起する以前の排水区域の状態がかわち、排水区域内の残積COD物質の多少(≒先行晴天日数の多少)により流出COD負荷量は極端に異なり、約10倍の差が生じる事がある。ii) 雨水流出が継続するとCOD濃度は相対的に減少し、一般的には流量vs. 負荷量曲線はU-型を描く。iii) 近接してハイドログラフのピークが複数出現するような事象では、初めのピークに比べ2番目以降のピーク付近ではCOD負荷量は順次小さくなる。以上の定性的な知見から流出COD負荷量を推定するためのモデルが具備すべき特性として次の事項が浮かび上ってくる。i) 先行晴天日数が大きい程排水区域内に堆積するCOD物質量は大きくなる。ii) 同一雨水流出量の場合、排水区域内に残積するCOD物質量が大きい程、流出COD負荷量は大きくなる。iii) 排水区域内に残積するCOD物質量が等しい場合、雨水流出量が大きい程流出COD負荷量は大きくなる。

晴天時にある一定レートで槽内に汚濁物質が流入堆積し、雨天時に流出雨水の槽内への流入によってそれら汚濁物質が完全混合により槽内から掃き出されると考えるとこれらの特性は表現できる。完全混合槽モデルによる汚濁物質の掃き出し現象は次式で表現される。

$$\frac{dC}{dt} = D(C_i - C) \quad (2) \quad \begin{matrix} \text{ここで、} C: \text{槽内濃度, } C_i: \text{流入水濃度} \\ D: \text{弁換率, } t: \text{時間} \end{matrix}$$

流入水は雨水と考え、その濃度  $C_i \approx 0$  とし、(2)式の両辺に  $V$  をかけ、

$$\frac{dP}{dt} = -DP = -Q \cdot P/V \quad (3) \quad \begin{matrix} \text{ここで } P: \text{槽内残留物質量, } V: \text{槽容積} \\ Q: \text{流入水量, } D = Q/V \end{matrix}$$

を得る。この完全混合槽モデルと排水区域からの雨天時流出COD負荷量の推定に適用するには、表-4の対応関係を考えればよい。

この完全混合槽モデルの適用の成否はいかに合理的な  $V$  値および流出開始前の排水区域内残積COD物質量を設定できるかにがらうていと言つてよい。この2つの変数について考察を加えよう。

(1)  $V$  値の意味とその算定法 完全混合槽における槽容積を表わす変数であるこの  $V$  値は、出現する負荷量曲線の立場から考えると、流出が始まってから負荷量曲線のピークが出現するまでの時間に関係する変数である。この値は実際には、排水区域の形状、面積、地表勾配、管渠勾配、堆積COD物質の粒径、腐度分布等の多くの変数を総合した非常に不確定な値であるが、ここでは排水区域の固有値であると考え、次のように推定する事と

表-3 最小自乗回帰式

|    | 水位上昇部(相関係数)                        | 水位下降部(相関係数)                    |
|----|------------------------------------|--------------------------------|
| C  | 0~2 $Q_s = 116.0 Q^{1.214} (0.79)$ | $Q_s = 82.3 Q^{1.532} (0.66)$  |
| O  | 3~7 $Q_s = 203.5 Q^{1.154} (0.75)$ | $Q_s = 140.1 Q^{1.642} (0.64)$ |
| D  | 8以上 $Q_s = 538.6 Q^{1.510} (0.76)$ | $Q_s = 273.4 Q^{1.599} (0.56)$ |
| SS | $Q_s = 520.6 Q^{1.569} (0.79)$     |                                |

表-4. 対応関係

|   | 完全混合槽   | 排水区域            |
|---|---------|-----------------|
| P | 槽内残留物質量 | 排水区域内残積物質量      |
| D | 弁換率     | 残積物質の出入の差       |
| Q | 流入水量    | 雨水流出量(掃流力)      |
| V | 槽容積     | 排水区域のCOD物質の物理特性 |

した。槽内物質の流出量(rate)は槽内残留物質量の時間的変化に等しいので(4)式が成立する。

$$Q_s = -dP/dt = Q/V \cdot P \quad (4)$$

今、流入水の時間的変化量として sine 波  $Q = a \{1 + \sin(bt - c)\}$  (5) と仮定しよう。(5)式を(3)式に代入して、 $t=0$ の時  $P=P_0$  として、両辺を積分すると(6)、(7)式が求められる。

$$\ln \frac{P}{P_0} = -\frac{a}{V} \left\{ t - \frac{1}{b} \cos(bt - c) + \cos c \right\} = -A \quad (6) \quad \text{故に} \quad P = P_0 e^{-A} \quad (7)$$

(5)、(7)式を(4)式に代入すると(8)式が求められる。  $Q_s = \frac{aP_0}{V} e^{-A} \{1 + \sin(bt - c)\}$  (8)

次に、槽内残留物質のピーク流出量の発生時刻  $t$  は  $dQ_s/dt = 0$  において、(9)式の解として求められる。逆に実測データから  $t$  値が知られると、その  $t$  に対応する  $V$  値は(10)式で算定される。

$$b \cos(bt - c) - \frac{a}{V} \{1 + \sin(bt - c)\}^2 = 0 \quad (9) \quad V = \frac{a \{1 + \sin(bt - c)\}^2}{b \cos(bt - c)} \quad (10)$$

(10)  $P_0$  値の意味とその算定法 流出開始前の排水区域内残積 COD 物質量を表わすこの  $P_0$  値は、負荷量曲線のピークの高さに関する重要な変数である。データを解析する中で、晴天時における残積 COD 物質の堆積パターンは対数関数的に増加するのではないかという感じを受けたが、ここでは、(11)式のような直線表現を用いた。

$$P_0 = P_{dep} \cdot N \cdot \Delta t + P_B \quad (11) \quad \text{ここで、} P_B: \text{前の流出終了時の排水区域内残積 COD 量, } N: \text{先行晴天 } \Delta t \text{ 数}$$

$P_{dep}$ : 晴天時に排水区域に付加される COD 物質量,  $\Delta t$ : 計算時間間隔

実際の計算は(3)、(4)式と次のような差分形になおし、逐次計算を行なう。

$$P_{t+\Delta t} = P_t e^{-\frac{Q}{V} \Delta t} \quad (12) \quad Q_s = P_t (1 - e^{-\frac{Q}{V} \Delta t}) / \Delta t \quad (13)$$

ここで、 $P_t$  および  $P_{t+\Delta t}$  はそれぞれある時刻  $t$  および  $t+\Delta t$  における排水区域内残積 COD 物質量  $Q_s$  は  $t \sim t+\Delta t$  間に流出してくる COD 負荷量(rate)

以上述べたような完全混合槽モデルを念頭において実測データを検討してみると、特に、比較的大きな流出事象が継続して生起する場合、晴天時に貯留堆積した汚濁物質が雨天時に完全混合槽モデルで掃流されるといった考え方は説明できない要素があることが解る。すなわち、雨天時汚濁物質の流出負荷量は、完全混合槽モデルで表現される部分と、ある一定値以上の雨水流出量になると流出雨水にともなって流出雨水量の大きさに応じて必ず流出してくる比較的流出しにくい部分とから構成されていると考えた。筆者らは後者の負荷量を基礎流出負荷量と名づけ、このモデルにとり入れた。

## [6] 変数値の決定と琴似川排水区域への適用

(a) 計算時間間隔 雨水滞水池の設計を考える場合、短時間の水質変動を追うのはあまり意味がない。ここでは、 $\Delta t = 15$  分とした。

(b) 晴天時における COD 物質の排水区域内貯留量 この値を決定するには長期連続実測データを必要とする。排水区域内の堆積物質がほとんど掃流されてしまうような大流出事象が生じた後から次の大流出事象までの連続負荷量データが得られれば、その間の総流出負荷量をその間の期間で除することによりこの値は求められる。昭和49年には連続データを得られなかったが、シミュレーションによるトライアルで全実測データにできるだけ適合するような値として  $12 \text{ kg}_r$  を得た。昭和50年には表-5に示すように、連続実測データから2つの値を得た。これら3つの値を考慮し、ここでは晴天時堆積量  $P_{dep} = 14 \text{ kg}_r$  と決定した。Gammsonらによる Northampton の実測データを表-6に示す。晴天時通日調査から、今回のモデル排水区域である琴似川排水区域の流入負荷量は  $2400 \text{ kg}_d$  であったので、表-6の比で  $0.14$  とする。

表-5. 実測晴天時堆積量

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| S.50.8.25.15<br>~S.50.9.7.7    | 15 $\text{kg}_r$ |
| S.50.10.21.21<br>~S.50.10.30.3 | 14 $\text{kg}_r$ |

表-6. Northampton における推定値

|       | SS   | KMnO <sub>4</sub> 値 | BOD  | NH <sub>4</sub> -N |
|-------|------|---------------------|------|--------------------|
| 堆積負荷量 | 0.32 | 0.18                | 0.10 | 0.03               |
| 流入負荷量 |      |                     |      |                    |

(c) 基礎流出負荷量 先行して大流出が生じた後、近接して生じた大流出事象について、横軸に雨水流出量ととり、縦軸に COD 負荷量ととってプロットした其の下限値を通る直線を引いて次式を求めた。

$$Q_{qs} = 120 \times (Q - 0.7) \quad (14) \quad \text{ここで、} Q_{qs}: \text{基礎流出量、} Q: \text{雨水量}$$

(d) V値 図-4に示す昭和49年10月23日のハイドログラフをSine曲線で近似し、また、実測負荷量曲線から得た  $t = 87 \text{ min}$  の値を(10)式に代入して  $V = 4500$  と得た。

(e) 初期堆積量 昭和49年には、本格的に観測を始めた7月30日を計算のスタートとし、この時の初期堆積量  $P_0 = 6900 \text{ kg}$  とした。また、8月26日の前半の大流出時にハイドログラフを欠測したため、後半の  $P_0 = 500 \text{ kg}$  とした。また、昭和50年には7月26日を計算のスタートとし、この時の  $P_0 = 2800 \text{ kg}$  とした。

計算結果の一部を図-5～図-15に示す。約3ヶ月間のシミュレーションを行なったところ、良好な結果を得ている。なお、昭和49年の計算結果については前報を参照されたい。

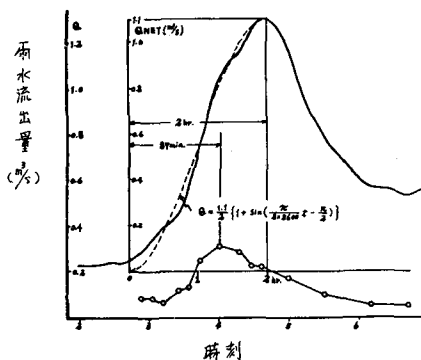
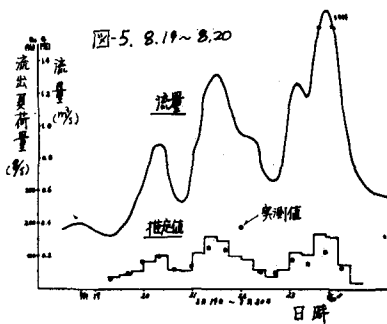
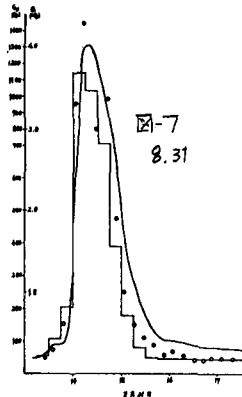


図-4. V値の決定(8.49.10.23データ)



## [6] まとめ

現在、大きな環境汚染問題となっている合流式下水道からの雨天時放流水による汚染問題に対処するための諸方策を講じる際の基礎となる流出汚染負荷量の一予測方法を示した。しかし、この手法の中には決定しなければならない係数  $V$ ,  $P_{dep}$ , 基礎流出負荷量曲線があり、これ等の係数等は、ここで筆者等が観測したのと同程度の実測データなければ決定できない種類のものである。要するに、現状では、この手法はそのまま他の排水区域には適用できないものである。

他の排水区域にも適用できるようにこのモデルを高めるには、多くのいろいろな物理特性を持った排水区域において実測データを採取し、そのデータを用いてここで筆者らが提案したと同じ手法で解析し、係数群を決定し、それらの係数群と排水区域の物理特性値群との対応関係が整理されねばならない。それまでは筆者らの研究は1つのケーススタディにすぎない。

