雨水貯留施設による非特定汚染源負荷の除去効率

近畿大学理工学部　江藤　剛治
㈱建設技術研究所　栗田　秀明

1．はじめに

降雨時に下水道から公共用水域に流出する非特定汚染源負荷を削減するための方策の一つとして，降雨時の流出水を一時貯留して降雨終了時に処理して公共用水域に放流するという方式がある。ここでは，雨水貯留施設による汚濁負荷の除去効率の式を導き，モンテ・カルロ・シミュレーションにより精度を検証した。

2．理論

(1) 確率模型

次のような仮定・記号を用いる。

① 雨量時系列は複合ポアソン過程で表示されるものとする。降雨時間間隔を t，一雨の総流量（以下一雨流量と書く）を v で表す。

② t，v ともに指数分布に従う。尺度母数を β_t，β_v で表す。

③ 一雨の総流出負荷量 w を次式で表す。

$$w = a\left(1 - e^{-k_c v}\right) \qquad (1)$$

定数 a，k_c は一定とする。

④ 全量カット方式とする。貯留容量を z_0 とし，貯留施設が満水になった後は，流出水は貯留施設には流入せず，直接公共用水域に放流するような構造になっているものとする（ファースト・フラッシュを貯留するため）。

⑤ 貯留施設内では完全混合とする。

⑥ 単位時間当りの処理水量 d（処理容量）は一定とする。単位時間に処理施設を通過する汚濁負荷量のうち，処理されて公共用水域には出ないものの割合 k_t（以後除去率と呼ぶ）は一定とする。対策を講じない状態での平均流出負荷量に対する，対策後の平均流出負荷量の減少量の割合を負荷減少率 ε と呼ぶことにする。

(2) 境界条件

d，z_0 を変数とする平均負荷減少率 ε の関数について，境界条件があらかじめ完全にわかっているわけではない。逆に，各境界近傍の関数形を求めることがさし当たっての目標である。

まず境界近傍の領域を表す条件を数式的に表現する。z_0 の大小は二つの基準で判断される。一つは平均一雨流量 $\overline{v}$（$=1/\beta_v$）との関係，他は降雨周期当たりの平均処理水量（処理容量 d ×平均降雨間隔 $\overline{t_R}$）との大小関係である。これより境界近傍の領域の種類はTable 1あるいはFig.1のように整理される。表中の D，Z_0 は無次元処理容量，貯

Takeharu ETOH，　Hideaki KURITA

留容量であり，次式で表される。

$$D=(\beta_v/\beta_t)\,d,\quad Z_o=\beta_v\, z_o \quad\cdots\cdots (2)$$

Table 1 Domains near boundaries

	A	B	C	D
領 域	$z_o \ll \frac{1}{\beta_t}d$	$d \gg \frac{\beta_t}{\beta_v}\ (=\frac{\overline{v}}{\overline{t}})$ $z_o \gg \frac{1}{\beta_v}\ (=\overline{v})$	$d \ll \beta_t z_o$ $d > \frac{\beta_t}{\beta_v}$	$d \ll \beta_t z_o$ $d < \frac{\beta_t}{\beta_v}$
無次元表示	$Z_o \ll D$	$D \gg 1$ $Z_o \gg 1$	$D \ll Z_o$ $D > 1$	$D \ll Z_o$ $D < 1$
物理的意味	Infinitesimal Reservoir 処理容量過大	処理容量貯留容量ともに過大	貯留容量過大処理容量やや過大	Infinite Reservoir 貯留容量過大

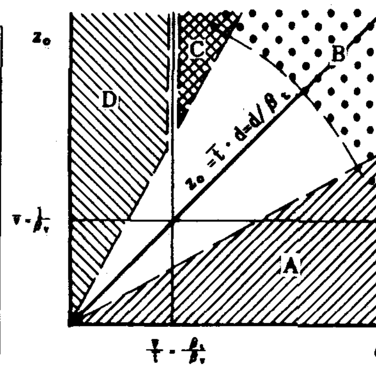

Fig. 1 Domains near boundaries

(3) 解 析

全ての領域における説明はページ数の関係上示せないため，領域Aについてのみ説明する。

a. 領域A

貯留容量に対して処理容量が十分大きいので，次の降雨が来る前に必ず空になる。一雨流量 v が z_o より小さいときは，v は全て一旦貯留されるので，溢流量は 0 となる。よって総流出負荷が処理される。よって処理される水量 v_t は v に等しく，処理される負荷量 w_t は v によって流入した全負荷 w に等しい。逆に v が z_o より大きいときは，v のうち最初の z_o が貯えられ処理される。

また，$v_{oR}=v-z_o$ が溢流量となる。ただし，この領域では処理容量が過大で，貯留施設がすぐ空になり処理施設が稼動しない状態が長くなる。

前記説明を数式により表現する。

$v \leqq z_o$ のとき

$$v_t=v,\quad w_t=w=a\,(1-e^{-k_c v}) \quad\cdots\cdots (3)$$

$v > z_o$ のとき

$$v_t=z_o,\quad w_t=a\,(1-e^{-k_c z_o}) \quad\cdots\cdots (4)$$

よって除去負荷量の期待値 $\overline{w_{tR}}$ は，

$$\overline{w_{tR}}=k_t\left\{\int_0^{z_o} a(1-e^{-k_c v})\,\beta_v\, e^{-\beta_v v}\,dv + a\,(1-e^{-k_c z_o})\int_{z_o}^{\infty}\beta_v\, e^{-\beta_v v}\,dv\right\}$$

$$=a\,k_t\,\frac{k_c}{k_c+\beta_v}\left\{1-e^{-(k_c+\beta_v)z_o}\right\}$$

$$=k_t\cdot\overline{w_R}\left\{1-e^{-(1+K_c)Z_o}\right\} \quad\cdots\cdots (5)$$

よって負荷減少率は，

$$\varepsilon = \frac{\overline{W_{tR}}}{\overline{W_R}} = k_t \{1 - e^{-(k_c+\beta_v) z_o}\}$$

$$= k_t \{1 - e^{-(1+K_c) Z_o}\} \qquad (6)$$

b．結果

同様に領域B，C，Dの解を求めると，全領域での負荷減少率は次のように示される。

$$\varepsilon = \begin{cases} k_t \{1 - e^{-(1+K_c) Z_o}\} & (\text{領域 A}) \\ k_t & (\text{領域B，C}) \\ k_t \dfrac{(1+K_c) D}{1+K_c D} & (\text{領域 D}) \end{cases} \qquad (7)$$

c．近似式

各境界値と，境界上の一次の微係数が，式(7) のそれに一致するような式を考える。

$$\varepsilon' = k_t (1+K_c) C (1 - e^{-Z_o / C}) \qquad (8)$$

ここに，

$$C = \begin{cases} D / (1+K_c D) & (D \leqq 1 \text{のとき}) \\ 1 / (1+K_c) & (D > 1 \text{のとき}) \end{cases}$$

式(8) は，D，Z_o 軸上で一次の微係数までが，DあるいはZ_o が大きいときは完全に式(7) に一致することは容易に証明される。よって式(8) は全領域にわたって負荷減少率 ε の式の一つの近似式になっていることが期待される。

3．モンテ・カルロ・シミュレーション

流出量と流出時間間隔を，標準指数乱数（$\beta_t = \beta_v = 1$）として発生させる。これを貯留施設に流入させ，貯留施設が満水になれば残量は溢流させる。流出直後より単位時間当りDの割合で貯留水を処理する。以上を電子計算機上でシミュレートする。全除去量を流出負荷量で割って ε を求める。施設容量（D，Z_o）の多くの組合わせに対して同様の計算をくり返し，（D，Z_o）と ε の関係を求める。これと式 (8)とを比較する。$k_t = 1$，$K_c = 1$ に対する計算結果をFig. 2～Fig. 3に示す。

以上より式(7) の理論解が正

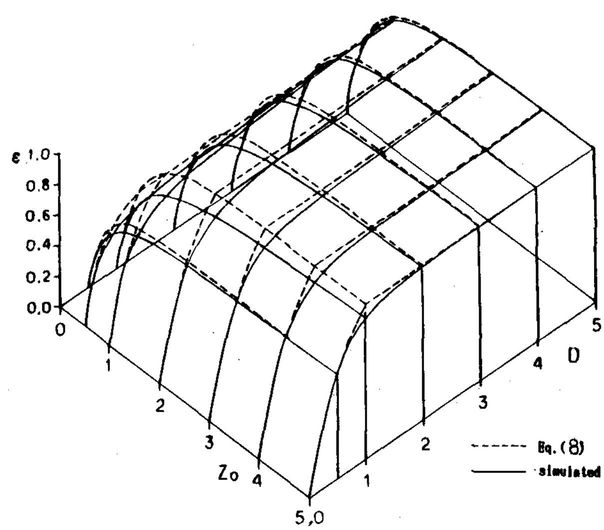

Fig. 2 Comparison between eq.(8) and exact solutions (simulated).
$k_t = 1$，$K_c = 1$

しく成り立っていることがわかる。式(8) も第1次近似解としては予想された程度の精度を持つことがわかる。ただし，最適な施設規模は $Z_o = D = 1$ の近傍に存在するものと予想されるが，この付近は領域の中央部に相当し，各境界からもっとも離れた所であるため近似解の精度が最も低くなる。

シミュレーション値と式(8)を比較し，誤差を（D，Z_o）の適当な関数で表示して高い精度を持つ近似式を作ることは容易である。ただし，現時点でそのような努力をする意味はない。現実の貯留－処理系に現在までに得られた成果を適用し，理論に必要な改良・拡張を加えることが先決である。その後再度精度を検討し，必要なら一部経験式を持ち込べばよいと考えられる。

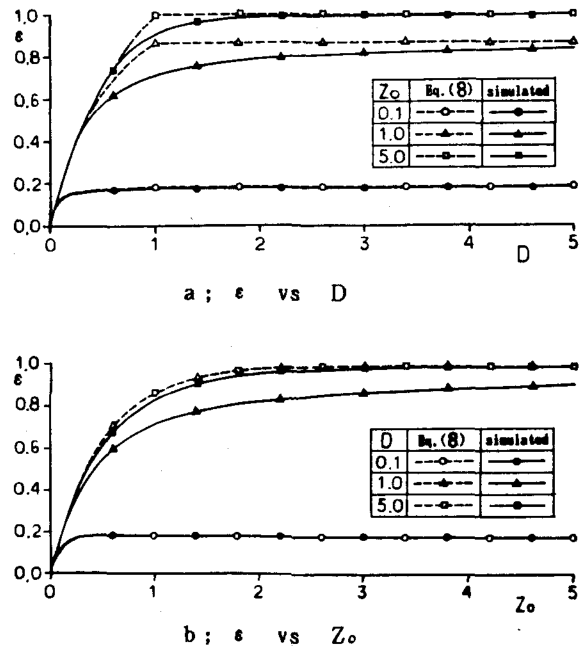

Fig. 3　Cross sections of Fig. 2

4．おわりに

この問題を最初に理論的に扱ったのはHoward [1] である。その後，何人かの研究者が理論解析を試みているが，その経緯は最近のLoganathan の論文[2] にまとめられている。これまでの研究では，領域Dに対する解は得られていない。また，水量の収支に関する確率模型を取り扱っており，水質を直接取り扱った研究はない。降雨継続中の水処理の効果を評価するために，降雨継続時間を組込んだモデルもあるが，一雨の総量と降雨継続時間を独立として仮定しているところに大きな問題がある。両者の相関係数は0.5 ～0.8 とかなり高い[3]。

筆者らは水処理の問題については，門外漢である。専門家の方々の御意見・御批判を期待している。それにもとづいてここで示した理論を，より現実性の高いものに改良したい。

〔参考文献〕 1）Howard,C.D.D. :Theory of storage and treatment-plant overflows, Journal of the Enviromental Engineering Div.,Proc.,ASCE,Vol.102,No.EE4,pp.709 ～722,1976.　2）Loganathan,V.G.,J.W.Delleur and R.I.Segarra: Planning detention storage for stormwater management, Journal of Water Resources Planning and Management Div., Proc.,ASCE,Vol.111,No.4,pp382-398,1985.　3）江藤剛治・室田 明：一雨降雨の1確率模型，土木学会論文集，No.345/Ⅱ－1,pp.101～109 ,1984.