

降雨の確率特性を考慮した雨水貯留施設の 汚濁負荷削減効果に関する検討

THE EFFECT OF THE PROBABILITY RAINFALL STORM WATER
STORAGE TANK ON POLLUTION LOAD REDUCTION

和田有朗¹・岸本宏司²・道奥康治³

Nariaki WADA, Koji KISHIMOTO and Kohji MICHIOKU

¹学生員 工修 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

²学生員 神戸大学大学院 自然科学研究科 (同上)

³フェロー会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (同上)

In this study, we performed a statistic analysis of rainfall events (the duration of dry days, the average rainfall intensity, the rainfall duration) using rainfall data for 20 years collected from the Kobe Marine Observatory, and also made a pollutant load run-off analysis using a Storm Water Management Model (SWMM). These data were used to examine stochastic characteristics of rainfall that are closely associated with pollution loads. The results of the analyses revealed that the Kobe area has frequent rainfall events with a combination of a rainfall intensity of 4 mm/hr and a rainfall duration of 25 hours. It was also found that the cumulative amount of pollution load runoff caused by a single round of rainfall was often about 5 to 10 kg in the river basins examined. We examined the effect of a storm water storage tank, in terms of reducing the pollution load, considering the stochastic characteristics of rainfall. It was found that a storage tank would be an effective measure for preventing inundation and also help to reduce the pollution load, through the effect of delaying rainfall run-off.

Key Words : *statistic analysis, rainfall events, non-point source pollution, probability rainfall, storm water storage tank*

1. はじめに

都市化に伴い、近年、不浸透面積率が増加し雨水流出量が増大し都市域における雨水流出による面源負荷の流出問題は公共用水域の水環境に影響を与えている。この対策として欧米はもとより我が国においても貯留・浸透施設を用いた流出量・汚濁負荷の制御が実施されている。こうした施設を有効に稼働させるためには、汚濁負荷と密接に関連する降雨の確率諸特性を考慮し、施設規模や運用形態を決定することが重要である。

本研究では、神戸市内小流域の雨水排除系における汚濁負荷流出の現地観測と神戸海洋気象台の20年間(1985～2004)の降雨データを用いて、降雨事象(先行晴天日数(t_d), 平均降雨強度(r), 降雨継続時間(T))の統計特性を解析評価し、統計解析とSWMM¹⁾を用いた汚濁負荷流出解析をもとに、累積負荷量に関する確率評価を実施した²⁾。

これらをもとに降雨特性を確率評価したものを考慮して雨水貯留施設を設置した場合の汚濁負荷削減効果の検討を行った。

2. 既往の研究

治水計画において、豪雨や洪水に関しては確率論的な降雨、流出の検討がなされている。高瀬ら³⁾は水文量の発生過程をポアソン過程と仮定し、豪雨のように大きな水文事象が発生するまでの時間をBayesの定理を用いて確率的に検討し、水文量の発生がポアソン過程に従うという仮定が定性的にみてほぼ許容し得ることを確認している。長尾⁴⁾は2変数ガンマ分布の理論についての降雨特性の研究を行っており、短時間雨量がガンマ分布に従うことを前提とした短時間における豪雨分布の特性を検討している。降雨強度曲線に関して、石黒⁵⁾は従来の公式(Sherman公式、Talbot公式など)では不明確であった確率的指標を導入して確率降雨強度曲線を提案し、室田ら⁶⁾、長尾ら⁷⁾は時間単位と水文量分布の関係から、降雨強度曲線の特性を理論的に検討している。また、和田ら⁸⁾は雨水貯留施設を用いてノンポイント汚染源負荷の流出制御方法を検討し、貯留施設の貯留容量をファーストフラッシュ用の一次貯留分とピーク流量用の二次貯留分に

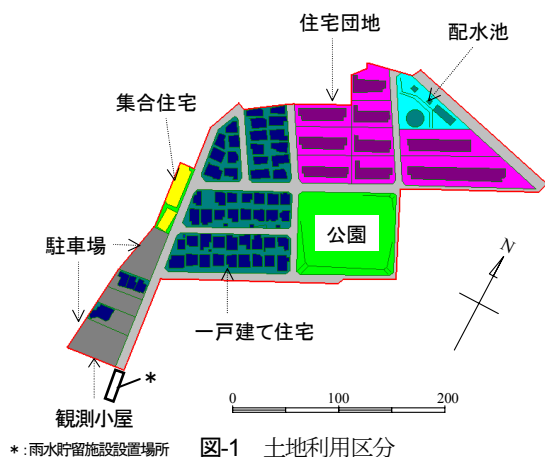


図-1 土地利用区分

分ける2段階貯留方式を用い、その効果を汚濁負荷流出シミュレーション解析により評価した。これにより、雨水貯留施設への雨天時汚濁負荷の効果的な流入・貯留方式を明らかにしている。G.Frenil⁹⁾らは、合流式下水道越流問題対策として、浸透施設と貯留施設を用いたBest Management Practices計画による負荷軽減の評価を行っている。Urban drainage model, Distributed infiltration BMP model, Centralized storage tank modelを用い、これらを組み合わせた様々なパターンの雨水対策を都市型の試験流域にてシミュレーションを行い、比較検討を行っている。しかし、降雨の確率特性を考慮して、流出量、汚濁流出負荷量の削減効果を検討した研究事例はこれまでほとんどない。

3. 汚濁流出負荷の現地観測

(1) 対象流域の概要¹⁰⁾

対象流域は都賀川水系に属する神戸市灘区の六甲山麓南側の市街地である。流域面積は4.81(ha)、標高差は約30(m) (最高標高242.1(m)、最低標高211.3(m))、勾配は2~11(%)と大きく、北から南にかけて急斜面を構成している。下水排除方式は分流式である。下水道網は開渠の道路側溝と、暗渠の雨水幹線から構成されている。雨水排水は道路側溝から最下流の明渠水路を通過して、都賀川水系六甲川へ流出する。図-1に示すように、降水量・流量・水質は最下流部に設置した小屋で観測した。当該水路は3面張りで、雨天時には負荷流出が速く、晴天時にはほとんど水量がないため汚濁負荷流出はない。

流域の土地利用は、住宅団地、一戸建て住宅、駐車場、集合住宅、公園、舗装道路からなり、公園、団地敷地、一戸建て住宅の庭を除けば流域の約72(%)が不透透域である。

(2) 対象とする降雨と流出

汚濁負荷流出解析に用いる4回の降雨事象の諸元を表-1に示す。2003年9月12日、2003年11月29日の二降雨はと

表-1 対象降雨の諸元

観測日	2003/9/12	2003/11/29	2004/7/10	2004/8/30
総降雨量 (mm)	10.8	29.2	14.6	9.5
降雨開始時刻	14:06	22:49	5:38	19:57
降雨終了時刻	0:41	17:54	12:00	0:46
降雨継続時間 (h)	10.6	19.1	6.4	4.8
平均降雨強度 (mm/hr)	1.0	1.5	2.3	2.0
先行晴天日数 2mm (日)	2.2	4.5	12.8	6.9
先行晴天日数 10mm (日)	2.2	4.5	12.8	6.9
先行晴天日数 30mm (日)	16.0	5.0	12.8	6.9

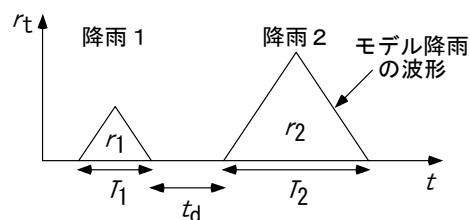


図-2 先行晴天日数(t_d), 平均降雨強度(r), 降雨継続時間(T)の定義

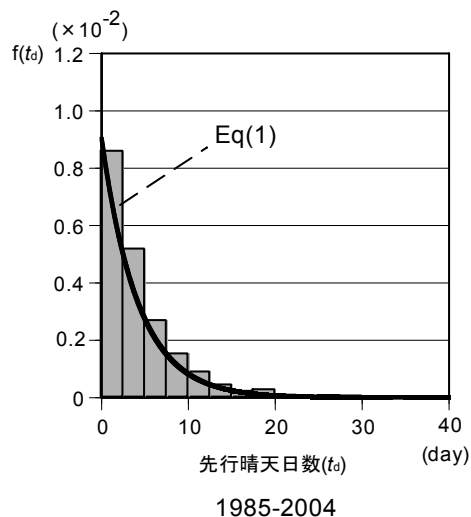


図-3 先行晴天日数(t_d)の確率密度分布

もに降雨継続時間が10時間を越える長雨である。11月29日の降雨は平均降雨強度、総降雨量ともに9月12日の降雨を大きく上回っている。

4. 確率を用いた降雨等の頻度解析

降雨時系列を特徴づける先行晴天日数(t_d), 平均降雨強度(r), 降雨継続時間(T)を図-2のように定義し、1985~2004年の期間において対象流域で観測された全ての降雨事象の統計特性を解析した。

(1) 先行晴天日数(t_d)の確率密度分布

降雨発生を稀な事象と捉え、指数分布への適合性を検討した。用いた確率密度関数は式(1)である¹¹⁾。

$$f(x) = ce^{-c(x-d)} \quad (1)$$

ここで、 c ：散らばりの程度を表す母数、 d ：下限境界値を示す母数である。図-3でヒストグラムが頻度密度(実際の統計値)、実線が同定された式(1)の確率密度関数である。結果として、先行晴天日数の確率密度関数は、指数分布に適合することが確認できた。

(2) 平均降雨強度(r)と降雨継続時間(T)の2変数確率密度分布

式(2)で表わされる⁷⁾ 2変数ガンマ関数を用いて、平均降雨強度と降雨継続時間の結合確率密度関数を同定した。

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{\Gamma(v)(\sigma_1\sigma_2)^{\frac{v+1}{2}}(1-\rho)^{\frac{v-1}{2}}} \times (x_1x_2)^{\frac{v-1}{2}} \times \exp\left\{-\frac{x_1}{\sigma_1(1-\rho)} - \frac{x_2}{\sigma_2(1-\rho)}\right\} \times I_{v-1}\left(\frac{2\sqrt{\rho}}{1-\rho} \sqrt{\frac{x_1x_2}{\sigma_1\sigma_2}}\right) \quad (2)$$

ここで、 v は形状母数、 σ_1 、 σ_2 は尺度母数、 ρ は相関母数、 $\Gamma(v)$ はガンマ関数、 $I_{v-1}(z)$ は $(v-1)$ 次の第1種変形ベッセル関数である。結果を図-4に示す。濃淡図が頻度密度の実測値であり、実線が式(2)のガンマ関数である。結果より神戸地域では $r=4(\text{mm/hr})$ 、 $T=25(\text{hour})$ までの範囲での降雨の頻度が大きいことがわかる。図-4より平均降雨強度と降雨継続時間に関しては、実際の頻度密度を概ね再現する確率密度関数を得ることができた。

(3) SWMMによる汚濁負荷流出解析

SWMMを用いて降雨継続時間、平均降雨強度の降雨特性が汚濁負荷流出におよぼす影響を検討した。図-4より神戸地域では $r=4(\text{mm/hr})$ 、 $T=25(\text{hour})$ までの降雨の組み合わせが多いことが明らかになった。これを考慮して $r=0.5\sim5(\text{mm/hr})$ 、 $T=1\sim30(\text{hour})$ 、 $t_d=0.5\sim40(\text{day})$ の範囲の様々な組み合わせの三角波形モデル降雨を用いて、汚濁負荷流出解析を行った。対象水質項目はSSである。雨水流出のパラメータは、表-1の四降雨の他、1997～2000年の期間における観測データ¹⁰⁾を対象として同定された。その結果は既報¹²⁾に示しており観測ハイドログラフとほぼ類似し、再現精度は十分と判断した。SSの汚濁負荷に関するパラメータ同定での対象降雨は、表-1の四降雨である。その結果は濃度、負荷量いずれも概ね観測値を再現していると判断した(紙面の都合上割愛する)。なお、汚濁負荷解析には以下のモデル式が用いられている¹²⁾。

1) 堆積モデル

$$P_0 = S_c \cdot A \cdot t_d^{S_p} \quad (3)$$

ここで、 P_0 ：初期堆積負荷量(kg)、 S_c ：堆積係数(kg/ha/day^{Sp})、 A ：サブキャッチメントの面積(ha)、 t_d ：先行晴天日数(day)、 S_p ：堆積指数(無次元)である。

2) 汚濁負荷流出モデル

$$C_w = P_0(1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

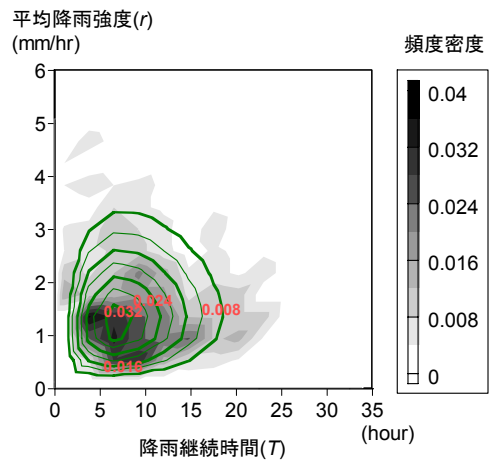


図-4 平均降雨強度(r)と降雨継続時間(T)の確率密度関数の適合

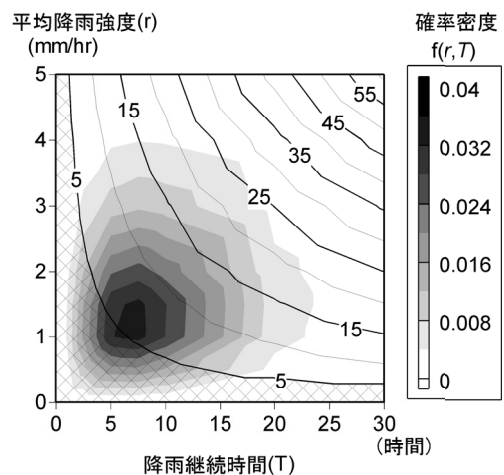


図-5 平均降雨強度(r)と降雨継続時間(T)の確率密度と累積負荷量の関係($t_d=0.5(\text{day})$ の場合)

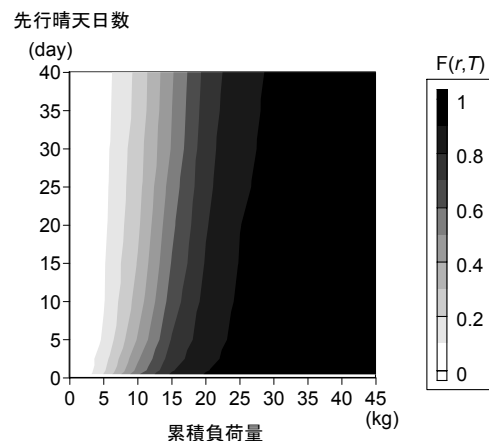


図-6 累積負荷量の確率分布

$$k = C \cdot r^p \quad (5)$$

ここで、 C_w ：累積流出負荷量(kg)、 t ：経過時間(hr)、 C ：係数(mm/hr^p)、 r ：runoff rate(mm/hr)、 P ：指数(無次元)である。式(4)の P_0 の中に先行晴天日数の他、先行降雨の特性(降雨量、降雨強度)等が反映されている。

よって、式(5)により流域に堆積した汚濁物質が降雨時にフラッシュアウトされる現象が概ね再現される。

(4) 累積負荷量の確率評価

(r, T)平面上において図-4の確率密度関数と累積負荷量（堆積物質の累積流出量）の汚濁負荷流出解析結果（実線）を重ね合わせると図-5のようになる。累積負荷量5(kg)を例にとれば、図-5のメッシュ部分の確率密度の積分値が累積負荷量5(kg)までの非超過確率に相当する。このようにして、それぞれ累積負荷量の確率分布(cdf)を求める。図-5の実線は $t_d=0.5(\text{day})$ の場合の累積負荷量である。同様に $t_d=0.5\sim 40(\text{day})$ 毎の累積負荷量の確率分布をそれぞれ求めると図-6のようになる。これを微分して、先行晴天日数(t_d)毎の累積負荷量の確率密度(pdf)が図-7のように求められる。実線が式(1)の確率密度関数である。ここで、先行晴天日数(t_d)の生起確率特性(図-3)を考慮し累積負荷量のpdf(図-7)に乗じて、先行晴天日数(t_d)、平均降雨強度(r)、降雨継続時間(T)の3つの水文量の確率を用いた累積負荷量の生起確率を評価することができる。すなわち、雨が降り対象流域から流出する累積負荷量を確率的に評価できる。結果を図-8に示す。対象流域では一降雨で流出する累積負荷量が5~10(kg)程度である確率が高い。

5. 降雨の確率を考慮した雨水貯留施設の汚濁負荷削減効果の検討

(1) 対象降雨と流出計算

筆者ら¹²⁾はモデル降雨波形を用いて、降雨継続時間やピーク降雨強度、総降雨量などの降雨特性が流出汚濁負荷におよぼす影響を感度解析によって検証した。今回も、三角波形のモデル降雨を想定する。対象とする降雨は、降雨継続時間を $T=7(\text{hour})$ とし、ピーク降雨強度が $r_p=2.5\sim 25(\text{mm/hr})$ の範囲にあり、総降雨量が $8.75\sim 87.5(\text{mm})$ の範囲である。なお、図-5の確率密度の大きい降雨（降雨解析で降雨継続時間と平均降雨強度の頻度の高いもの）を含むように設定した。先行晴天日数(t_d)は20年間の降雨データから得られた平均値(5day)を用いた。この降雨データをSWMMに入力し、流出量、流出濃度、流出負荷量のシミュレーションを行った。このシミュレーション結果をもとに、貯留施設を対象流域に現実に施工が可能な施設規模として、容量100~500(m^3)、その幅を5(m)、水深を3.0(m)、長さを6.66~33.33(m)とし、シミュレーションのケースを表-2のように設定した。なお、雨水貯留施設は図-1の最下流点の道路下に設置することを想定した（図-1中の*印）。

(2) 貯留池の沈殿効率

貯留池の沈殿効率はストークスの公式に従って、粒径区分を2.0(mm)~74(μm)、74(μm)~25(μm)、25(μm)~

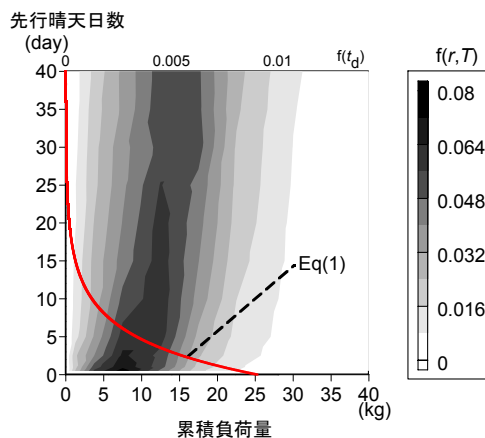


図-7 累積負荷量の確率密度分布

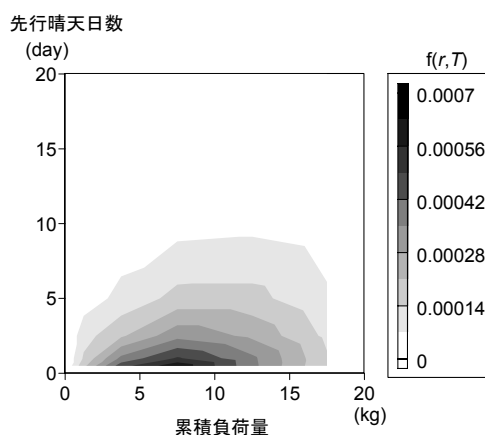


図-8 先行晴天日数(t_d)の確率を掛け合わせた累積負荷量の確率密度分布

表-2 シミュレーションケース

No.	幅(m)	長さ(m)	水面積(m^2)	水深(m)	容量(m^3)
CASE1	—	—	—	—	—
CASE2	5.0	6.66	33.30	3.0	100.0
CASE3	5.0	13.33	66.65	3.0	200.0
CASE4	5.0	20.00	100.00	3.0	300.0
CASE5	5.0	26.66	133.30	3.0	400.0
CASE6	5.0	33.33	166.65	3.0	500.0

(注) : CASE1は貯留を行わない場合である。

1(μm)に分けて、沈降速度を算出したものを用いた。

(3) SWMMにおける雨水貯留施設からの放流式

放流は貯留施設において越流が始まる前に堰等によって貯留水を排出することを意味する。この放流を随時行うことにより、効率的な沈殿処理を行うことができる。SWMMでは堰における流れを用いている。水の流れを、貯留施設内では常流、堰を越え放流されるときには射流とすると、堰を越える瞬間（堰の頂上）で水深は限界水深をとる。そのときの流量は式(6)で表される。

$$Q = v_c A_c = \sqrt{gh_c} h_c b = b \sqrt{gh_c^3} \quad (6)$$

ここで、 Q ：流量(m^3/s)、 v_c ：限界流速(m/s)、 A_c ：断面積(m^2)、 g ：重力加速度($9.8\text{m}/\text{s}^2$)、 h_c ：限界水深(m)、 b ：堰の幅(m)である。また、貯留部での流速をほぼ0とすることにより、堰頂上部からの水深 $h(\text{m})$ はベルヌーイの定理より式(7)で表される。

$$h = h_c + \frac{Q^2}{2gh_c^2b^2} \quad (7)$$

式(7)に式(6)を代入すると式(8)が得られる。

$$h_c = \frac{2}{3}h \quad (8)$$

式(8)を式(6)に代入すると、式(6)は式(9)で表される。

$$Q = b\sqrt{g\left(\frac{2}{3}h\right)^3} = 1.7 \times bh^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

SWMMでは堰からの放流量が式(10)で与えられる。

$$Q = D_1(y - y_{\min})^{D_2} \quad (10)$$

ここで、 D_1 、 D_2 ：入力係数、 y ：水深(m)、 $y_{\min}$ ：最小水深(m)である。

式(9)より式(10)に $D_1=1.7 \times b(\text{m}^{3/2}/\text{s})$ 、 $D_2=1.5$ を入力する。また、限界水深は水深の1割である $0.3(\text{m})$ とした。

(4) 雨水貯留施設を設置した場合の汚濁負荷シミュレーション

降雨特性を確率評価したものを考慮して雨水貯留施設を設置した場合の汚濁負荷削減効果の検討を行った。対象降雨、シミュレーションケースは前述(5(1)、表-2)の通りである。モデル降雨に対する雨水貯留施設を設置した場合の流出量、流出濃度、流出負荷量のシミュレーション結果の一例を図-9～11に示す。流出初期における汚濁負荷の大きいファーストフラッシュ分を効果的に削減していることがわかる。貯留池を設けることにより、流出を遅れさせ、浸水対策とともに汚濁負荷の軽減を期待できる。貯留池の効果は水量、負荷量ともに大きい。

(5) 貯留容量の違いによる累積負荷量の除去効率の検討

図-12に貯留容量の違いによる累積負荷量の変化を示す。貯留容量が大きくなれば、累積負荷量は減少する。図-13に貯留容量の違いによる流出負荷除去量の変化を示す。貯留容量が大きくなれば、流出負荷除去量も増大し、貯留容量が $100(\text{m}^3)$ でも $5(\text{kg})$ 以上の流出負荷量を削減できる。総降雨量 $35(\text{mm})$ までの降雨の場合は、流出負荷除去量は貯留容量が $100(\text{m}^3)$ と $500(\text{m}^3)$ であまり差はない。図-14に貯留容量の違いによる流出負荷除去効率(=流出負荷除去量(kg)/累積負荷量(kg) $\times 100(\%)$)の変化を示す。総降雨量 $35(\text{mm})$ までは貯留容量 $100(\text{m}^3)$ で汚濁負荷を約6割削減できる。神戸地域で生起確率の大きい降雨(降雨解析で降雨継続時間と平均降雨強度の頻度の高いもの)については、貯留容量 $100(\text{m}^3)$ で汚濁負荷を

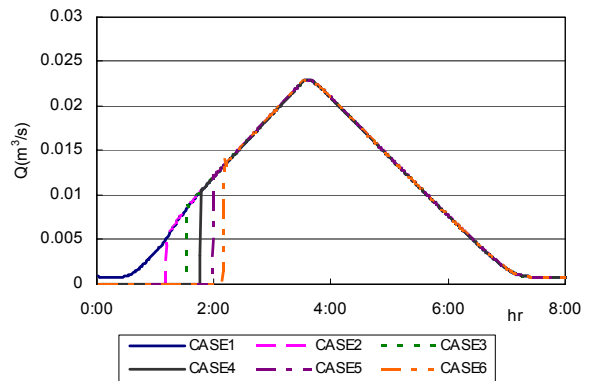


図-9 モデル降雨に対する流出量のシミュレーション結果

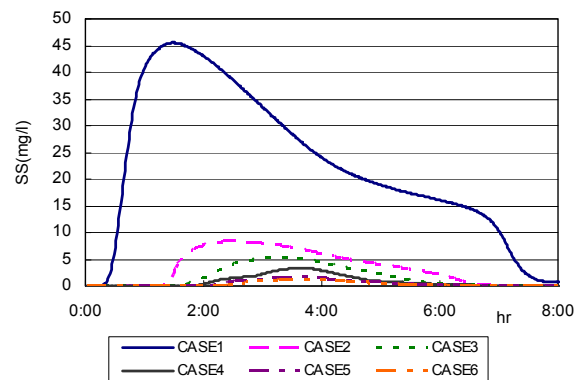


図-10 モデル降雨に対する濃度のシミュレーション結果

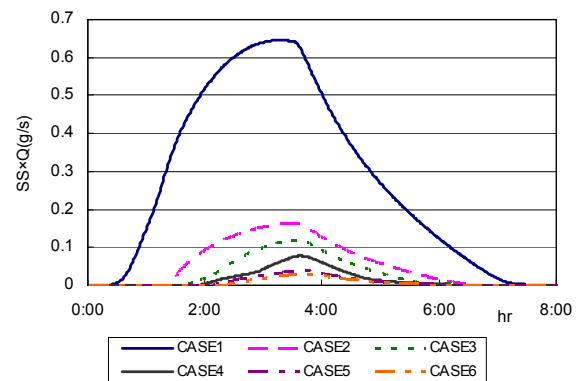


図-11 モデル降雨に対する負荷量のシミュレーション結果

約7割削減できる。貯留施設を設けると $100(\text{m}^3)$ 、 $200(\text{m}^3)$ までは累積負荷量は急激に減少し、特に総降雨量の大きい降雨の減少量は大きい。除去効率も規模の小さい段階では急に大きくなり、その除去効果は大きくなる。ピーク降雨強度が同じで降雨継続時間が短い場合についても検討したが、汚濁負荷の除去効率に差はあまりみられなかった(紙面の都合上割愛する)。確率密度の小さい降雨(降雨解析で降雨継続時間と平均降雨強度の頻度の低いもの)については、貯留容量 $100(\text{m}^3) \sim 200(\text{m}^3)$ で $15(\text{kg})$ 以上の流出負荷を除去できる。そのため、対象流域では一降雨で流出する累積負荷量が $5 \sim 10(\text{kg})$ 程度である生起確率が高いことから、対象流域の確率密度の大きい降雨を考慮すると貯留容量 $100(\text{m}^3) \sim 200(\text{m}^3)$ で効果的に汚濁負荷を削減できると考えられる。

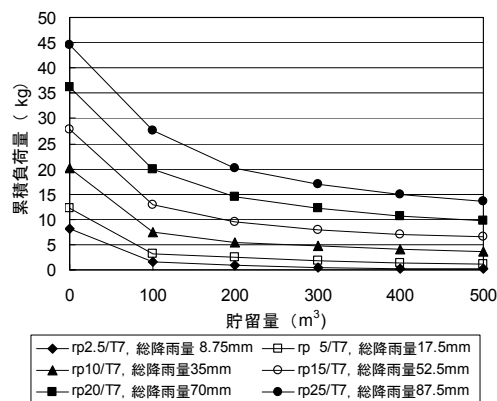


図-12 貯留容量の違いによる累積負荷量の変化

(注) $r_{p2.5/T7}$ とはピーク降雨強度 $r_p=2.5(\text{mm/hr})$ 、降雨継続時間 $T=7(\text{hour})$ の降雨を表す。

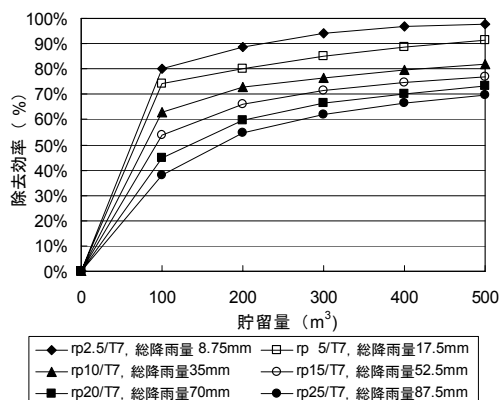


図-14 貯留容量の違いによる流出負荷除去効率の変化

6. むすび

降雨事象の統計特性を解析評価し、統計解析とSWMMを用いた汚濁負荷流出解析をもとに、累積負荷量に関する確率評価を実施した。これらをもとに降雨特性を確率評価したものを考慮して雨水貯留施設を設置した場合の汚濁負荷削減効果を検討した。

その結果、先行晴天日数の確率密度関数は、指数分布に適合することを確認した。

平均降雨強度と降雨継続時間に関しては、実際の頻度密度を概ね再現する確率密度関数を得ることができた。その結果、神戸地域では $r=4(\text{mm/hr})$ 、 $T=25(\text{hour})$ までの範囲での降雨の頻度が大きいことがわかった。

対象流域では一降雨で流出する累積負荷量が5~10(kg)程度である生起確率が高いことを明らかにした。これらをもとに降雨特性を確率評価したものを考慮して雨水貯留施設を設置した場合の汚濁負荷削減効果を検討した。貯留池を設けることにより、雨水流出を遅らせ、浸水対策とともに汚濁負荷の軽減も図れることを明らかにした。100(m³)~200(m³)規模の施設について、公共用水域に流出する累積負荷量は急激に減少し除去効果も大きい結果が得られた。今後、運用形態についても検討し、雨水処理施設の計画・設計等に結びつけていく予定である。

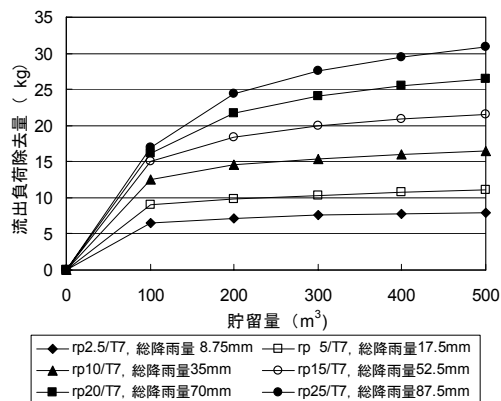


図-13 貯留容量の違いによる流出負荷除去量の変化

謝辞：本研究に御協力いただいた神戸市建設局下水道河川部の関係各位に厚くお礼申し上げます。神戸大学神田徹名誉教授には多くの有益なご助言を頂きました。神戸大学大学院生阪西大輔君には降雨データ収集・整理に協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- Wayne C. Huber et al : Storm Water Management Model, Version4, ; User's Manual,U.S.EPA/ 600/3-88/001a,1988.
- 岸本宏司, 和田有朗, 道奥康治他：雨天時流出の累積負荷量に関する確率評価, 平成18年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, 2006.
- 高瀬信忠, 小川正宏：水文量の発生確率に関する一考察, 土木学会論文集, No.369/II-5, pp.147-153, 1986.
- 長尾正志：短時間豪雨分布の推定に関する二変数ガンマ分布の応用, 名古屋工業大学学報, Vol.25, pp.325-333, 1973.
- 石黒正儀：特性係数法による確率降雨強度式の算定法について, 土木学会論文集, No.74, pp.19-26, 1961.
- 室田明, 江藤剛治, 田中剛：水文量の和に関する統計的研究, 土木学会論文報告集, No.223, pp.23-31, 1974.
- 長尾正志, 角屋睦：二変数ガンマ分布とその適用に関する研究(2), 京大防災研年報, 第14号, pp.43-56, 1971.
- 和田安彦, 三浦浩之：雨水貯留施設によるノンポイント汚染源負荷制御方法の検討, 土木学会論文集, No.566/VII-3, pp.25-34, 1997.
- G. Freni, G. Mannina : Modelling urban stormwater impact mitigation by using BMPs and storage tanks, 10th International Conference on Urban Drainage, CD-ROM, 2005.
- 神田徹, 神吉和夫, 渡辺政広, 前田康宏：都市小流域へのSWMMの適用におけるモデル・パラメータの値について, 水工学論文集, 第45巻, pp.79-84, 2001.
- 神田徹, 藤田睦博：水文学—確率論的手法とその応用—, pp.13-40, 技報堂出版, 1979.
- 和田有朗, 道奥康治, 辻義和：都市流域の流出汚濁解析と負荷特性におよぼす降雨形態の影響, 水工学論文集, 第49巻, pp.1579-1584, 2005.

(2006.9.30受付)