

雨水貯留施設の規模の違いが洪水調節効果 に及ぼす影響の評価

SIMULATION OF THE EFFECTS OF STRUCTURAL SCALE OF DETENTION FACILITIES ON FLOOD CONTROL

北川善廣¹・久保田康司²・植野公博³・鮎川 登⁴

Yoshihiro KITAGAWA, Kouji KUBOTA, Masahiro UENO and Noboru SUKEGAWA

¹ 正会員 国士舘大学教授 工学部都市システム工学科 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1)

² 学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

³ 正会員 フォーラムエンジニアリング 技術部 (〒105-6024 東京都港区虎ノ門 4-3-1)

⁴ フェロー 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

Stormwater detention facilities have been used to reduce flood runoff from urbanized areas. They are recognized as means to reduce peak flows of downstream rivers, and it is needed that the planning of them are done on a watershed-wide basis. In this paper a method to estimate the flood control effects of detention facilities on a watershed-wide basis, and the results of its application to Tsurumi river basin are presented. We could estimate the flood control effects of detention facilities by comparing the hydrographs calculated by the present method for Tsurumi river basin with and without detention basins respectively. It is found that there was little effect on flood control of the small scale detention facilities.

Key Words : flood control, detention facilities, urban river, tsurumi river

1. はじめに

1970年代以降における急激な宅地化の進行に伴う洪水流出増に対処するために、鶴見川流域には数多くの雨水貯留施設が設置されている。雨水貯留施設は、当初直下流の下水道、排水路、河川に対する洪水調節を目的として設置されてきたが、近年では鶴見川本川に対する洪水調節効果が期待されており、雨水貯留施設の洪水調節効果を定量的に評価することが必要とされている。

鶴見川の流域内には、雨水貯留施設の規模が小さいものから大きいものまで含めると2000年時点で約3,000の雨水貯留施設が設置されており、そのタイプも様々である。したがって、雨水貯留施設の洪水調節効果を定量的に評価する場合には、雨水貯留施設の河川に対する洪水調節効果を評価するための流出解析モデルを用いる必要がある。以前、著者は宅地を雨水貯留施設が設置されている区域と設置されていない区域に分け、雨水貯留施設が数多く設置されている宅地については個々の施設について洪水調節計算を行うのは大変であると考え、小流域内に存在する複数の雨水貯留施設を代表する雨水貯留施設を一つ定め、代表の雨水貯留施設について洪水調節計算を行う簡便な流出解析モデルを提案した¹⁾。そのモデルを用いて、雨水貯留施設を設置されている場合と設置

されていない場合について流出解析を行い、それぞれの流量ハイドログラフを比較することによって雨水貯留施設の洪水調節効果を推定している²⁾。雨水貯留施設のタイプや規模の違いが洪水調節効果に及ぼす影響を定量的に評価するためには、流域に設置されている全ての雨水貯留施設を対象として洪水調節計算を行う必要がある。本研究は、以前に著者が提案した流出解析モデルを個々の雨水貯留施設を対象として洪水調節計算を行うように改良し、河川に対する雨水貯留施設の洪水調節効果について検討するものである。

本論文では、タイプと規模の異なる雨水貯留施設が数多く設置されている鶴見川を対象として、まず関係機関から提供して頂いた資料に基づいて雨水貯留施設の設置状況と雨水貯留施設のタイプと規模の違いについて整理検討し、つぎに小流域内に設置されている個々の雨水貯留施設について洪水調節計算を行うように改良した流出解析モデルを用いて流出計算を行い、その再現性を検証し、さらに雨水貯留施設の規模の違いが洪水調節効果に及ぼす影響について検討した結果を述べる。

2. 対象流域の概要

図-1に示すように、鶴見川は東京都町田市地先を源流

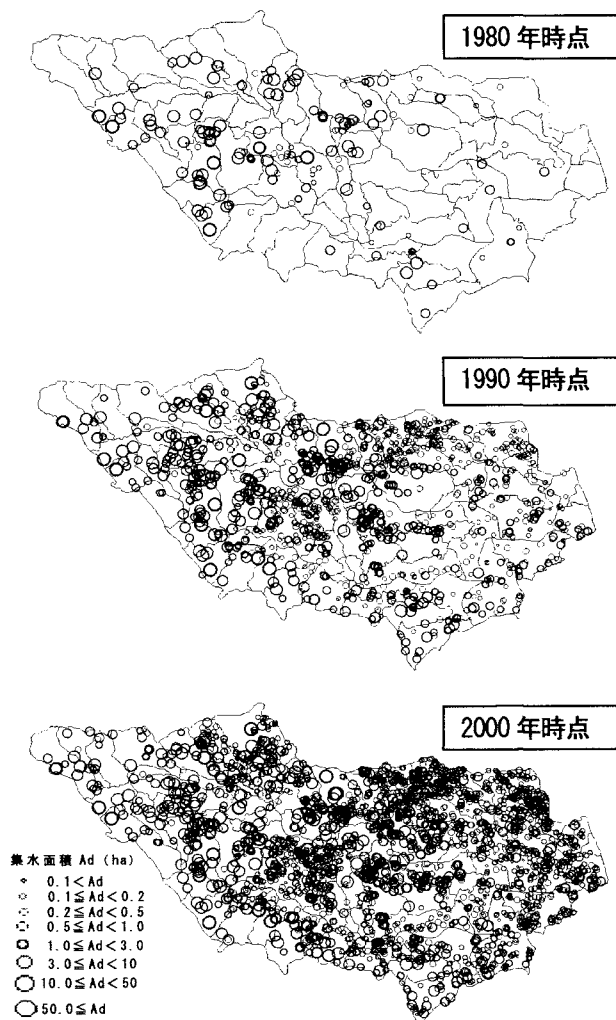
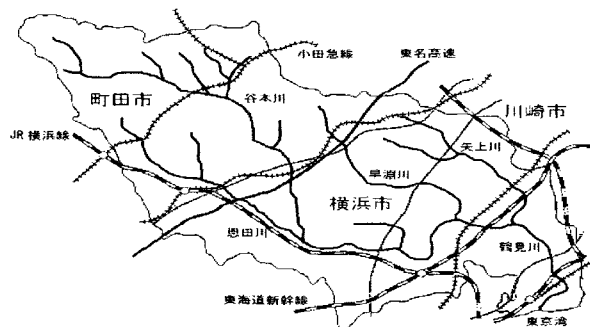


図-2 雨水貯留施設の流域分布

とし、神奈川県横浜市と川崎市の多摩丘陵地を流れ、横浜市鶴見区生麦で東京湾に注ぐ流域面積 235km²、幹線流路長 43km の一級河川である。流域の地形は、流域の 80% が丘陵・台地で、残りの 20% が河川沿いの低地で構成されている。鶴見川流域では、1958 年時点の宅地化率は 10% であったが、2000 年時点の宅地化率は 85% である。鶴見川は、1970 年代以降の急激な宅地化の進行に伴って発生した水害問題に対処するために全国に先駆けて総合治水対策特定河川事業が行われ、雨水貯留施設の設定などにより流域の保水・遊水機能の確保を意図とした治水対策が講じられている。

3. 雨水貯留施設の設置状況

鶴見川流域には、規模が異なる様々なタイプの雨水貯留施設が数多く設置されている。関係機関から提供して頂いた資料によると、2000年時点の設置総数は2902（うち、諸元不明の施設は75）である。なお、雨水浸透施設の規模は雨水貯留施設に較べて非常に小さく、設置事例もわずかである。1980年時点、1990年および2000年時点における流域内の雨水貯留施設の分布を集水面積の階級別に示すと、図-2のようになる。図-2によると、1980年時点では雨水貯留施設は上流域に数多く分布しており、1990年および2000年の時点では雨水貯留施設はほぼ全域にわたって分布し、また集水面積の大きい施設が上流域に、集水面積の小さい施設が下流域に数多く分布していることがわかる。

つぎに、同流域に設置された雨水貯留施設のタイプ別および規模別の設置状況について検討した結果を述べる。同流域に設置された雨水貯留施設のタイプを多段式、単一式、校庭貯留式、棟間貯留式、駐車場貯留式、各戸貯留式および地下貯留式に分類し、タイプ別の雨水貯留施設の設置個数、集水面積および貯水容量の経年変化について整理した結果³⁾によると、この流域では 1980 年代以降において雨水貯留施設の設置個数が急増しており、2000 年時点では多段式のタイプの施設に較べて校庭貯留式、各戸貯留式、駐車場貯留式などのタイプの施設の設置個数は多く、全体に占める割合は 88%である。しかし、集水面積および貯水容量が流域全体に占める割合は、校庭貯留式、各戸貯留式、駐車場貯留式などの施設では

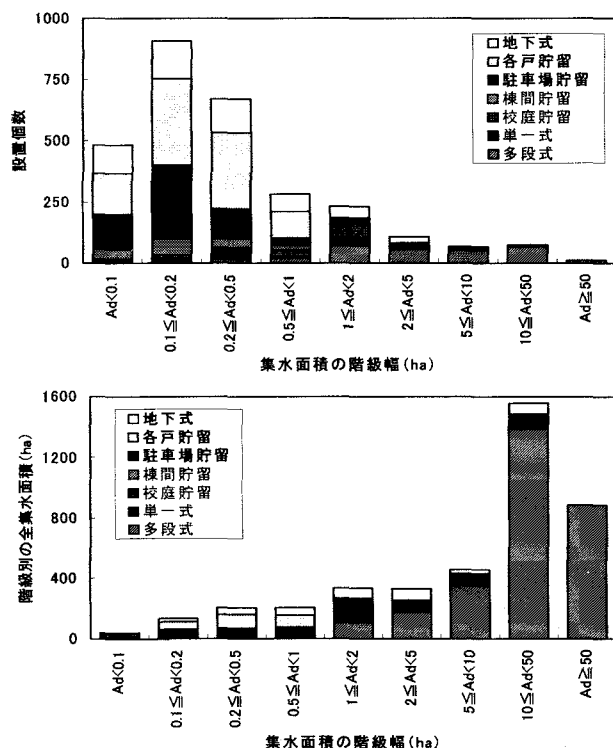


図-3 集水面積の階級別の設置個数と全集水面積

30%および 26%と小さいが、多段式の施設では 70%および 74%と大きくなっている。2000 年時点における集水面積の階級別の設置個数と階級別の全集水面積についてタイプ別に示すと、図-3 のようになる。図-3 によると、設置個数が多いが全集水面積が小さいのは校庭貯留式、各戸貯留式、駐車場貯留式などのタイプの施設であり、逆に設置個数は少ないが全集水面積の値が大きい施設は多段式のタイプの施設であることがわかる。

以上の結果、鶴見川流域に設置されている雨水貯留施設は、設置個数は少ないが規模の大きい多段式の施設と、設置個数が多いが規模の小さい校庭貯留式、各戸貯留式、駐車場貯留式など施設に分類される。

4. 流出解析モデルとその再現性

流出解析モデルは¹⁾、流域斜面からの流出計算と河道における洪水流の合流および伝播の計算からなる。このモデルでは、流域を地形、河川、排水路などを考慮して小流域に分割し、各小流域から河道への流出点を定める。そして、与えられた降雨ハイドログラフに対して各小流域からの流量ハイドログラフを計算し、河道の流出点へ流出させ、上流からの洪水流と合流させながら洪水流を

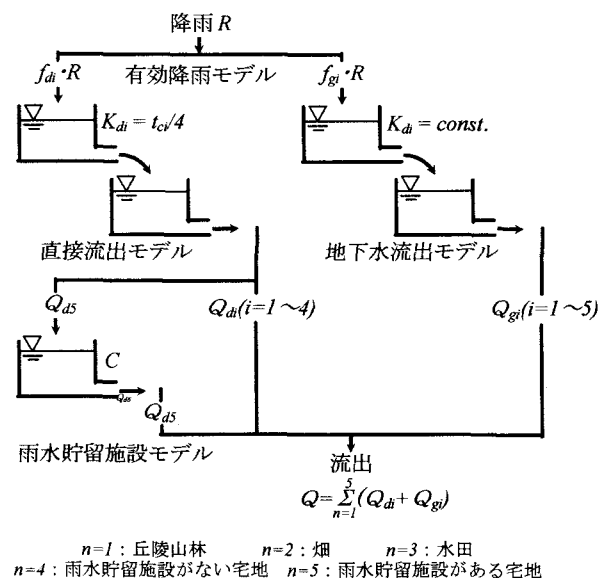


図-4 小流域の流出モデル

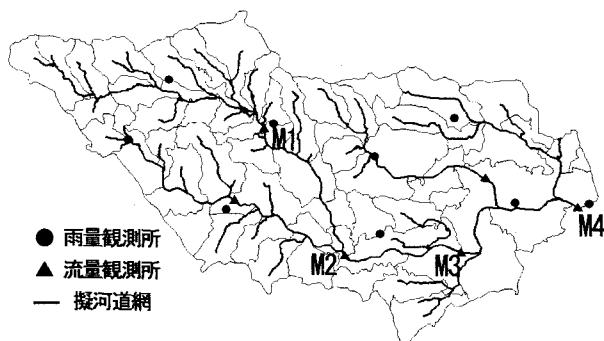


図-5 流域分割図

伝播させて河川の所定地点における流量ハイドログラフを算出する。なお、小流域からの流出は図-4 に示すように直接流出と地下水流出に分けて考え、それぞれ2段の線形貯水池モデルを用いて計算する。

2段の線形貯水池モデルによると、面積 A の流域からの継続時間 t_r の一定強度の有効雨量 R_e の降雨による流出量 $Q(t)$ は次式で計算される。

$$Q(t) = \begin{cases} \beta \cdot A \cdot R_e \left\{ 1 - \left(1 + \frac{t}{K} \right) \exp \left(-\frac{t}{K} \right) \right\} & : t \leq t_r \\ \beta \cdot A \cdot R_e \left\{ \left(1 + \frac{t-t_r}{K} \right) \exp \left(-\frac{t-t_r}{K} \right) - \left(1 + \frac{t}{K} \right) \exp \left(-\frac{t}{K} \right) \right\} & : t > t_r \end{cases} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 K は貯留係数、 β は単位換算係数である。

地下水流出に対する貯留係数 K_g は、 $K_g = \text{const.}$ とし、直接流出に対する貯留係数 K_d は、kinematic wave 理論により次式で与える。

$$K_d = t_c / 4; \quad t_c = \begin{cases} \beta_1 \left\{ L / (\alpha R_{ed}^{2/3}) \right\}^{3/5} = t_{c0} & : t_r \geq t_{c0} \\ t_r + \beta_2 \{ 3 / (5\alpha) \} & \\ (L - \beta_3 \alpha R_{ed}^{2/3} t_r^{5/3}) / (R_{ed} t_r)^{2/3} & : t_r < t_{c0} \end{cases} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 t_c は流域斜面の集中時間、 R_{ed} は直接流出に対する有効雨量、 L は流域斜面長、 $\alpha = \sqrt{\sin \theta} / N$ 、 θ は流域斜面の傾斜角、 N は流域斜面の等価粗度であり、 β_1 、 β_2 、 β_3 は単位換算係数である。

直接流出に対する有効雨量 R_{ed} は、次式で算定する。

$$R_{ed} = f_d \cdot R \quad ; \quad f_d = \begin{cases} f_{d1} : \Sigma R \leq R_c \\ f_{d2} : \Sigma R > R_c \end{cases} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 f_{d1} は直接流出率、 f_{d1} は 1 次直接流出率、 f_{d2} は 2 次直接流出率、 R は雨量、 ΣR は累加雨量、 R_c は流出率が f_{d1} から f_{d2} に変化するときの累加雨量である。

地下水流出に対する有効雨量 R_{eg} は、次式で算定する。ただし、 f_g は地下水流率であり、 f_g' は一定とする。

$$R_{eg} = f_g \cdot R \quad ; \quad f_g = f_g' (1 - f_d) \quad \dots\dots(4)$$

流域を図-5 に示すように 76 の小流域に分割し、各小流域からの流出量を土地利用（丘陵林地、畑、水田、宅地）別に 2 段の線形貯水池モデルを用いて直接流出量と地下水流出量を算定し、それらの和として小流域からの流量ハイドログラフを算定する。

宅地に雨水貯留施設が設置されている場合は、面積が A_d の雨水貯留施設の集水区域からの流量ハイドログラフを 2 段の線形貯水池モデルで算定し、それを雨水貯留施設への流入量ハイドログラフとして貯留の連続式に基づいた洪水調節計算を行い、雨水貯留施設からの流量ハ

イドログラフを求める。なお、宅地に複数の雨水貯留施設が設置されている場合は、流出解析の対象出水年以前に設置された雨水貯留施設のみを対象として個々の施設について前述の計算を行う。雨水貯留施設の構造は、平面形状が貯水面積 F の正方形とし、施設の底面に直径 D の放流孔が設置されているものとする。

流出計算を行う際に必要な各小流域の土地利用別の斜面の面積、長さおよび勾配と河道の断面データは関係機関から提供して頂いた資料に基づいて与えた。とくに、斜面の長さと勾配は、2.5m メッシュ標高データを用いて GIS ソフトで作成した流水線図と擬河道網に基づいて、それぞれ計測した。モデルパラメータは、参考文献 1) および 2) の場合と同一の値を与えた。

ここでは、流出解析モデルの再現性を検証するために、7つの出水事例について流出解析した結果の一例を流量観測所 4 地点について示すと図-6 のようになる。なお、図中には雨水貯留施設が設置されていないものとして流出計算を行った場合を細線で示した。図-6 によると、流

量ハイドログラフの計算値（雨水貯留施設が設置されている場合；太線）は観測値（○印）とほぼ一致していることがわかる。また、7つの出水事例について流出解析モデルの再現性を以下の指標で評価する。

$$\text{ピーク流量誤差 } E_p = \frac{|Q_{op} - Q_{cp}|}{Q_{op}}$$

ピーク生起時間差 E_t ：負のときは観測ピークの生起時刻より早い

$$\text{相対二乗誤差 } E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_o(i) - Q_c(i)}{Q_{op}} \right)^2$$

ここに、 Q_{op} は観測ピーク流量、 Q_{cp} は計算ピーク流量、 $Q_o(i)$ は i 時の観測流量、 $Q_c(i)$ は i 時の計算流量、 n は計算時間ステップ数である。上記の指標を示すと表-1 のようになり、本流出解析モデルによる流出計算の再現性は概ね良好であることがわかる。

表-1 再現性の評価

地点 M1	ピーク流量(m³/s)		ピーク流量誤差	ピーク生起時間差(min)	相対2乗誤差
	観測値	計算値			
1981/10/22	201.3	229.74	0.141	-45.0	0.009
1982/8/2	109.9	155.96	0.419	-15.0	0.041
1982/9/12	270.7	299.00	0.105	15.0	0.008
1990/9/30	173.1	216.11	0.248	-2.5	0.005
1991/9/19	280.8	265.83	0.053	-35.0	0.008
	279.5	271.57	0.028	-17.5	
1996/9/22	149.3	196.97	0.319	-40.0	0.009
2001/9/9	163.8	122.93	0.250	-17.5	0.003

地点 M2	ピーク流量(m³/s)		ピーク流量誤差	ピーク生起時間差(min)	相対2乗誤差
	観測値	計算値			
1981/10/22	513.1	523.88	0.021	60.0	0.003
1982/8/2	330.5	328.52	0.006	35.0	0.017
1982/9/12	635.0	707.58	0.114	2.5	0.014
1990/9/30	539.2	552.32	0.024	15.0	0.001
1991/9/19	625.5	689.68	0.103	-37.5	0.013
	581.5	624.71	0.074	-40.0	
1996/9/22	454.8	459.80	0.011	35.0	0.001
2001/9/9	381.2	334.03	0.124	-42.5	0.006

地点 M3	ピーク流量(m³/s)		ピーク流量誤差	ピーク生起時間差(min)	相対2乗誤差
	観測値	計算値			
1981/10/22	521.7	586.01	0.123	-30.0	0.008
1982/8/2	343.3	291.76	0.150	15.0	0.057
1982/9/12	667.2	834.59	0.251	-38.0	0.009
1990/9/30	718.2	691.51	0.037	15.0	0.003
1991/9/19	827.7	748.94	0.095	-40.0	0.024
	798.8	705.76	0.116	-47.5	
1996/9/22	597.8	528.51	0.116	-22.5	0.004
2001/9/9	-	-	-	-	-

地点 M4	ピーク流量(m³/s)		ピーク流量誤差	ピーク生起時間差(min)	相対2乗誤差
	観測値	計算値			
1981/10/22	755.5	943.44	0.249	0.0	0.017
1982/8/2	329.0	396.00	0.204	33.0	0.029
1982/9/12	1050.8	1265.50	0.204	10.0	0.011
1990/9/30	996.4	1165.00	0.169	-7.5	0.026
1991/9/19	1021.4	1176.00	0.151	-55.0	0.018
	-	1058.00	-	-	
1996/9/22	-	896.66	-	-	-
2001/9/9	-	-	-	-	-

※ -は観測データなし

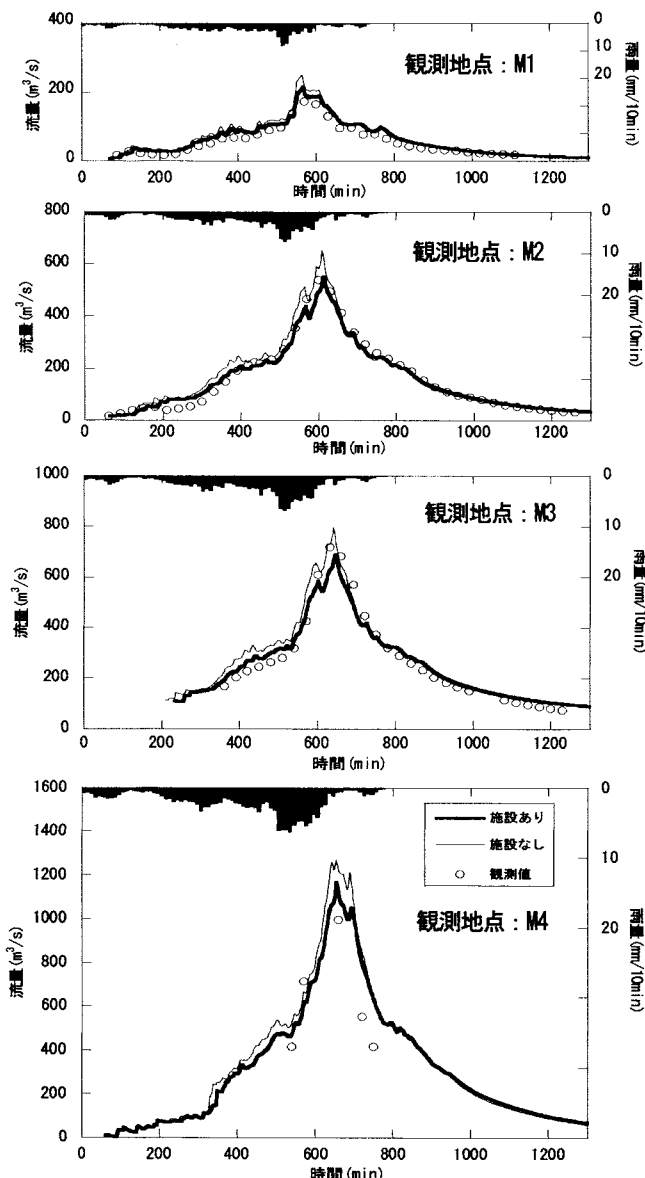


図-6 流出解析結果の一例(1990年9月出水の場合)

5. 雨水貯留施設の洪水調節効果

雨水貯留施設の洪水調節効果は、雨水貯留施設が設置されている場合と設置されていない場合について流出解析を行い、それぞれの流量ハイドログラフを比較することによって評価することができる。ここでは、雨水貯留施設の洪水調節効果はピーク流量低減率により評価する。ただし、雨水貯留施設の洪水吐きの構造が不明であるため、ここでは洪水吐きからの流出はないものとする。

ピーク流量低減率は

$$R_{QP} = \frac{Q_{po} - Q_{pd}}{Q_{po}} \times 100 \quad \cdots (5)$$

で表示する。ここに、 Q_{po} は雨水貯留施設がない場合のピーク流量、 Q_{pd} は雨水貯留施設がある場合のピーク流量である。7つの出水事例について雨水貯留施設が設置されている場合と設置されていない場合として流出計算した結果（図-6の太線と細線）に基づいて、図-5に示した流量観測地点 M1, M2, M3 および M4 におけるピーク流量低減率 R_{QP} を上式により求め、宅地面積に対する雨水貯留施設のカバー率（＝集水面積 A_d / 宅地面積 A_r × 100）との関係で示すと図-7 のようになる。なお、流出のピーク時では丘陵林地、畑、水田からの流出よりも雨水貯留施設が設置される宅地からの流出分が多くなるので、ピーク流量低減率には宅地面積に対する雨水貯留施設のカバー率が強く影響するものと考えた。図-7 によると、出水事例によりプロットはばらついてはいるが、宅地面積に対する雨水貯留施設のカバー率が大きくなるとピーク流量低減率 R_{QP} は大きくなる傾向が認められる。

つぎに、雨水貯留施設の規模別の洪水調節効果について検討する。なお、前述の3. の検討結果に基づいて、雨水貯留施設の規模を集水面積で表示し、以下の4ケースについてそれぞれ流出計算を行う。

- ケース 1：集水面積が 0.5ha 以上の雨水貯留施設が存在する場合
- ケース 2：集水面積が 1ha 以上の雨水貯留施設が存在する場合
- ケース 3：集水面積が 3ha 以上の雨水貯留施設が存在する場合
- ケース 4：集水面積が 10ha 以上の雨水貯留施設が存在する場合

上記のケース 1～ケース 4 について、任意の降雨に対して流出計算を行って求めたケース 1～ケース 4 の場合と雨水貯留施設が存在しない（雨水貯留施設が設置されていない）場合の流量ハイドログラフを比較することにより、集水面積の規模別の雨水貯留施設の洪水調節効果を評価することができる。1990 年 9 月出水の降雨について

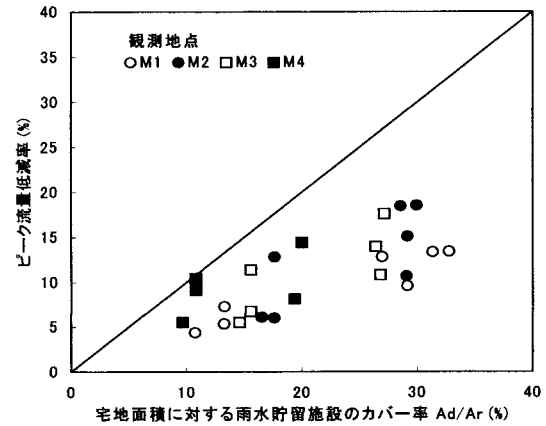


図-7 ピーク流量低減率と雨水貯留施設のカバー率の関係

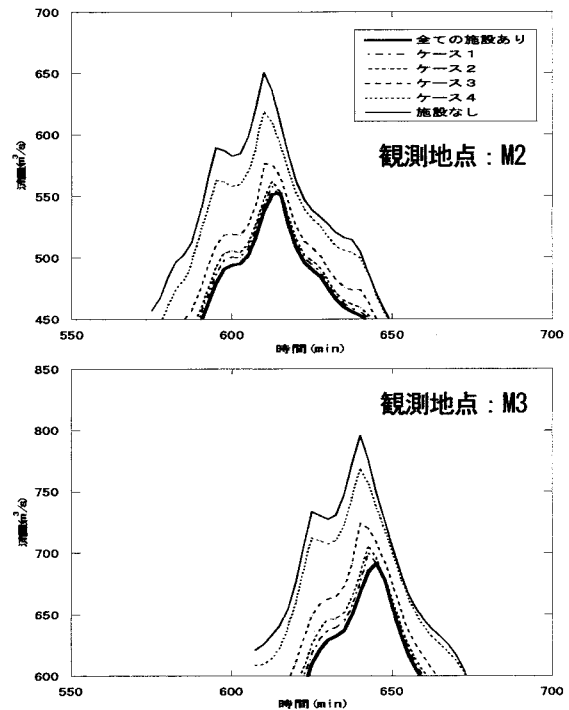


図-8 規模別の流量ハイドログラフ

て観測地点 M2 および M3 における流量ハイドログラフを比較した例を図-8 に示す。ここでは、雨水貯留施設が設置されている場合（全ての雨水貯留施設が存在する場合）と設置されていない場合について式(5)で求めたピーク流量低減率 R_{QP} に対する4つのケースのピーク流量低減率 $R_{QP1} \sim R_{QP4}$ の割合をピーク流量低減効果の寄与率として表示する。なお、雨水貯留施設への流入量（集水区域からの流出計算で求められた流出量）は集水面積の大きさに関係し、雨水貯留施設の貯水容量は雨水貯留施設への流入量に基づいて設計されるので、雨水貯留施設の貯水容量は集水面積の大きさに関係する。また、雨水貯留施設からの流出量は、雨水貯留施設の水位（すなわち、貯水容量）と放流孔の直径に関係する。雨水貯留施設の洪水調節効果を向上するためには、放流孔の直径を小さくして直下流の水路への流出量を調節すればよいことになる。したがって、雨水貯留施設の洪水調節効果には、施設の規模である集水面積 A_d あるいは貯水容量 V と放流孔

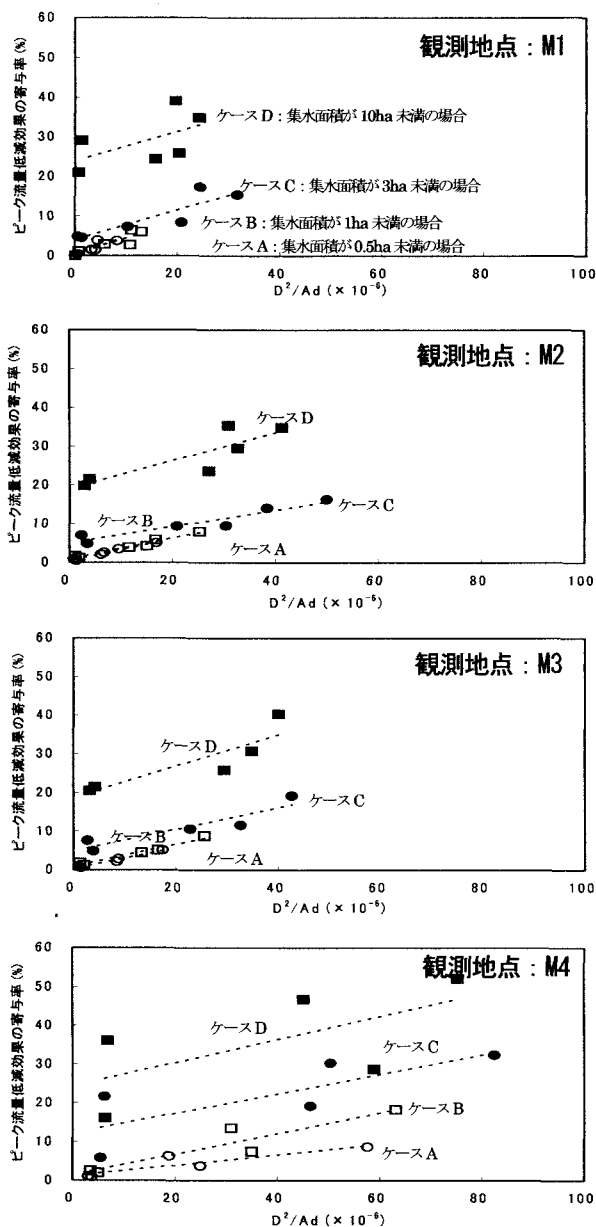


図-9 ピーク流量低減効果の寄与率と D^2/A_d の関係

の直径 D の大きさが関係することが考えられる。

ここでは、雨水貯留施設の規模を無次元量 D^2/A_d で表示し、集水面積の規模別のピーク流量低減効果の寄与率との関係について検討する。7つの出水事例の降雨について、ケースごとに流出計算を行って求めた集水面積の規模別のピーク流量低減効果の寄与率と D^2/A_d の関係を示すと、図-9 のようになる。なお、図-9 では、4つのケースの規模の違いをわかりやすくするために、ケース A: 集水面積が 0.5ha 未満の雨水貯留施設が存在する場合、ケース B: 集水面積 1ha 未満の雨水貯留施設が存在する場合、ケース C: 集水面積が 3ha 未満の雨水貯留施設が存在する場合、ケース D: 集水面積が 10ha 未満の雨水貯留施設が存在する場合として、ピーク流量低減効果の寄与率を各々算出して表示している。図-9 によると、 D^2/A_d の値が大きくなるとピーク流量低減効果の寄与率は小さくなり、ケース A および B のように集水面積の小さい雨水貯留施設の場合はピーク流量低減効果の寄与率

は小さくなり、ケース C および D のように集水面積の大きい雨水貯留施設の場合はピーク流量低減効果の寄与率は大きくなることがわかる。

6. おわりに

今回得られた成果を要約すると、以下のようになる。

- 1) 鶴見川流域に設置されている雨水貯留施設は、1980 年の時点では雨水貯留施設のほとんどが上流域に設置され、2000 年時点では全域的に設置されている。また、集水面積 1ha 未満の校庭貯留式、各戸貯留式、駐車場貯留式などの設置個数が多く、規模の大きい多段式が少ない。
- 2) 流域に設置されている全ての雨水貯留施設を対象として洪水調節計算を行うように改良した雨水貯留施設モデルを含む流出解析モデルを用いて流出計算した結果、その再現性は良好であった。
- 3) 規模別の集水面積の雨水貯留施設について流出計算した結果によると、校庭貯留、各戸貯留、駐車場貯留などの集水面積の小さいタイプの雨水貯留施設のピーク流量低減効果の寄与率は小さくなり、洪水調節効果はほとんど期待できないことがわかった。
- 4) 雨水貯留施設の規模を無次元量 D^2/A_d で表示し、規模の異なる雨水貯留施設のピーク流量低減効果の寄与率との関係について検討したところ、上記 3) と同様の結果が得られた。

なお、この流域には今回解析対象とした出水事例以降において、雨水貯留施設のほかに、河道からの越流式による調節地などの施設が設置されている。今後は、これらの施設の洪水調節効果についても検討していくつもりである。

謝辞

本研究の遂行にあたり、貴重な資料を提供して頂いた京浜河川事務所をはじめとする関係各位に謝意を表します。また、国土館大学工学部 4 年生の伊藤達也君と青木雄一朗君には資料整理等に協力して頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鮎川・北川：都市周辺の中小河川の洪水流出解析，土木学会論文集 No.443/II-18，pp.1-8，1992。
- 2) 丹・齋藤・北川・鮎川：雨水貯留施設の洪水調節効果の評価に関する研究，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，2-044，pp.87-88，2004。
- 3) 北川・植野・鮎川：鶴見川流域における雨水貯留施設のタイプと規模に関する一考察，水文・水資源学会 2004 年研究発表会要旨集(誌上発表)，pp.276-277，2004。

(2004.9.30 受付)