

都市河川の流出抑制に及ぼす雨水貯留浸透対策の効果

指導教官 富永 晃宏 教授

河岸 毅

1. はじめに

水は地球上の限りある資源であり、私たちの生活や産業に不可欠な要素である。その一方で、多量の水は、時として洪水等の災害をもたらしている事実もある。河川水や雨水を制御することは古くからの課題であり、今後の命題でもある。

最近では、都市域拡大の沈静化と治水整備の進捗により、広域的な浸水被害はめっきり少なくなってきた。しかし、小規模の浸水被害は繰返し発生しており、流域規模での広域的な治水対策に加えて、それぞれの地域に応じた「きめ細かな対策」の重要性も増してきている。

複雑な都市を考慮するほど、解析に必要な情報量は多くなり、その収集には多大な労力が必要になる。そこで本研究では、それらを解決する手段として、GISに着目した。堀川流域の集水区域の一部を対象とし、GIS (Mapinfo) を利用して流域の土地利用を住宅地図レベルまで拡大し、宅地・屋根・駐車場・車道・歩道等の細かい土地利用状況を把握した。その上で透水性確保や各戸貯留や公園貯留等の小規模貯留の効果を、MOUSE (水理計算ソフト) を用いて貯留浸透対策が流出に及ぼす影響を算出し、きめ細やかな貯留浸透対策の効果を把握することを目的とする。

2. 対象流域と GIS データ

堀川流域内ではほぼ全域に合流式下水道が整備されている。晴天時は、全ての汚水が下水処理場に送られて処理されるようになっているが、雨天時では下水管に汚水と雨水が流れ込み一緒になって下水処理場に送られている。雨水が一定量を超えた場合は汚水と一緒に雨水吐室や雨水ポンプ場から処理されることなく直接河川へ放流されている。都市化の進展により、雨天時における下水道の排水能力に余裕がなくなっているため、少量の降雨でも、汚水が下水管に集まった雨水と一緒に河川へ放流されやすくなっている。行政レベルでは、合流式下水道の改善事業として調節・滞水池の整備が表1の様に行われており、最近では浸透マスなどの設置も進められているが、住民レベルでの浸透対策や各戸貯留はまだまだ普及する余地が残っている。

表1 主な雨水貯留施設

名称	貯留量(m ³)	稼動年度
久屋雨水調整池	2,000	昭和53年度
高辻雨水滞水池	30,000	昭和62年度
福德雨水調整池	7,500	平成6年度
福江雨水滞水池	31,000	平成11年度
若宮大通調節池内合流対策施設	19,000	平成14年度

本研究では、デジタウン (ゼンリン電子住宅地図) と名古屋市下水道配管図をもとに、Mapinfo を用いて対象流域の土地利用とマンホール位置情報のデータを取得した。流域面積は約 20ha、マンホールは 157 箇所、管渠数は 174 本、小流域数は 180 におよぶ。現状の土地利用を、屋根・宅地・車道・歩道・公園・小緑地・駐車場の7つに分類した。駐車場は、都市域における浸透域化や貯留施設との併設が期待されているため、特別に取り上げることにした。小緑地とは、公園ではない緑地や浸透が見込めそうな裸地をまとめて、区分したものである。図1にMapinfoにて作図した対象流域の状態を示す。



図1 対象流域図 (Mapinfoにて作図)

3. 表面流出計算手法

本研究で採用した表面流出モデルは Kinematic Wave 法 (非線形貯留法) である。従来の研究では T-A 法 (時間一面積法) を用いて流出計算を行ってきたことが多かった。しかし、T-A 法では個々の流域に対する流出率を定めた上で、シミュレーションを行わなければならなかった。しかし、本来は流域の土地利用の状態や降雨形態によって表面の流出 (率) は異なってくるはずである。Kinematic Wave 法は、一律な流出率を与えることなく、個々の流域に対しての流出量を算出し、その結果を用いて、管渠計算を行うことができる。

Kinematic Wave 法では、表面流出は開水路の流れとして計算され、重力と摩擦力のみを考える。流出量はさまざまな水文損失と有効流域面積によって制御される。また、流出ハイドログラフの形状は、流域パラメータ、すなわち流域長さ・勾配・表面粗度によって制御される。MOUSE に組み込まれた Kinematic Wave 法では次のようなパラメータに基づき計算される。

3.1 有効降水強度の計算

最初のステップは、有効降水強度の計算であり、有効降水強度とは表面流出に寄与する降水のことである。シミュレートされた水文過程は、下記の条件と式に従って計算された蒸発量・湿潤損失・浸透量・凹地貯留損失といったさまざまな損失が考慮される。これらの損失を差し引いた残りの降水が有効降水であり、一般に次式によって定義される。

$$I_{eff}(t) = I(t) - \{I_w(t) + I_l(t) + I_s(t)\} \dots (1)$$

$$I_{eff} \geq 0 \dots (2)$$

ここに、
 $I(t)$ = 時刻 t における実降水量
 $I_w(t)$ = 時刻 t における湿潤損失
 $I_l(t)$ = 時刻 t における浸透量
 $I_s(t)$ = 時刻 t における凹地貯留損失

3.2 表面流出の追跡計算

流出は、有効降水強度が0を超えたときにはじまる。水理過程は Kinematic Wave 方程式を用いて全表面について一度に記述される。この記述は、流域上の流れの条件は一様、即ち各流域表面タイプの表面にわたって水深が等しいと仮定している。この種の流域モデルは、非線形貯水池モデルとも呼ばれている。時刻 t における表面流出は次のように計算される。

$$Q(t) = M \cdot B \cdot I^{1/2} \cdot y_R(t)^{5/3} \dots (3)$$

ここに、
 M = マニング数
 B = 河道幅、 $B[m] = A[m^2]/L[m]$
 I = 流域勾配
 $y_R(t)$ = 時刻 t における流出斜面上の水深
 水深 $y_R(t)$ は次の連続方程式から求められる。

$$I_{eff}(t) \cdot A - Q(t) = \frac{dy_R}{dt} \cdot A \dots (4)$$

ここに、
 I_{eff} = 有効降水量
 A = 有効流域面積
 dy_R = 流出斜面上における水深変化量
 dt = 時間ステップ

3.3 浸透能

浸透能についてはホートン式を採用した。図2に計算で与えた3種類の浸透能の関係を示す。名古屋市雨水流出抑制施設設計指針によると、地盤浸透能力は、原則として、現地にて浸透試験を行い、浸透能を決定することになっている。但し、諸事情により現地観測が出来ない場合には、飽和透水係数とし

て、 $1.94 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ を用いることができる。そこで、この値を最終浸透能の値として採用し、初期浸透能については、この最終浸透能の値を参考にし、表2に示す様に定めた。

$$I_H(t) = I_{l-\min} + (I_{l-\max} - I_{l-\min}) \cdot \exp[-k_a t] \dots (5)$$

ここに、
 $I_H(t)$ = ホートンによる浸透能
 $I_{l-\max}$ = 最大浸透能
 $I_{l-\min}$ = 最小浸透能 (完全飽和時)
 k_a = 湿潤時の減衰係数
 t = 浸透過程開始後の経過時間

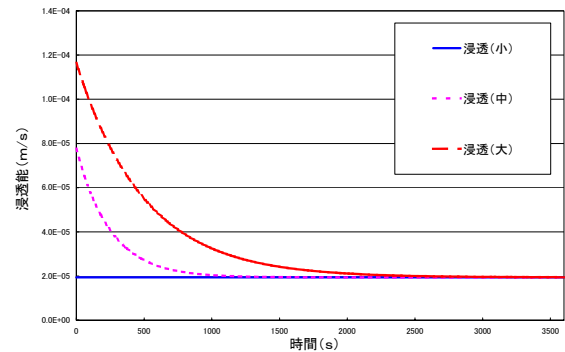


図2 浸透域別の浸透能 (ホートン式)

3.4 その他のパラメータ

湿潤損失は降雨初期時に流域を湿らし、流出に寄与しないことによる損失である。名古屋市の指針ではこの損失の値を明確に定められておらず、妥当な値を探し出すことができなかった。本研究では MOUSE 内でのデフォルト値として与えられている、 $5.0 \times 10^{-5} \text{m}$ (0.05mm) を採用することにした。

凹地貯留損失は降雨初期時に流域の凹地に水が溜まり、流出に寄与しないことによる損失である。名古屋市の指針では、不浸透域には一律 2.0mm の凹み地貯留損失を与えることになっており、その値を採用することにした。また、浸透域については、流出解析マニュアル利活用マニュアル (財団法人 下水道新技術推進機構) で採用されている 6.0mm を浸透域 (大) に対し採用した。ただし、本研究では浸透域の区分が3種類 (小・中・大) に分類しているので、浸透域 (中) には、4.0mm、浸透域 (小) には 3.0mm を用いることにした。表2には表面流出計算に用いたパラメータを示す。

表2 表面流出計算にかかわるその他のパラメータ

	屋根	平地	浸透(小)	浸透(中)	浸透(大)
湿潤損失 (m)	5.0E-05	5.0E-05	5.0E-05	5.0E-05	5.0E-05
凹地貯留損失 (m)		2.0E-03	3.0E-03	4.0E-03	6.0E-03
初期浸透能 (m/s)			1.9E-05	7.8E-05	1.2E-04
最終浸透能 (m/s)			1.9E-05	1.9E-05	1.9E-05
指数 (1/s)			0.0E+00	4.0E-03	2.0E-03
逆ホートン式の係数 (1/s)			1.0E+00	1.0E-04	3.0E-04
マニング数 $m^{1/3}/s$	80	70	30	30	12

3.5 流域タイプの面積と割合

MOUSEでKinematic Wave法により流出計算をする際に、不浸透域（2種）と浸透域（3種）に分類する。そこで、取得したデータをもとに、3つの流域タイプを定め、それぞれについて表面流出計算を行った。流域タイプ毎の分類と、面積・割合を表3、表4にまとめる。流域タイプ1は、住宅地図をもとに取得したデータであり、それをもとに、タイプ2・3を想定した。タイプ2は、タイプ1で不浸透域の平地に属していた歩道と駐車場を、浸透域（大）に改善したものである。タイプ3は、タイプ1で不浸透域の平地に属していた歩道・駐車場と浸透域（小）だった、小緑地を、浸透域（大）にし、宅地を浸透域（中）にした場合を想定している。

表3 流域タイプ毎の分類

	タイプ1	タイプ2	タイプ3
屋根	屋根域	屋根域	屋根域
車道	平地	平地	平地
歩道	平地	浸透域(大)	浸透域(大)
公園等	浸透域(中)	浸透域(中)	浸透域(大)
小緑地	浸透域(小)	浸透域(小)	浸透域(小)
宅地	平地	平地	浸透域(中)
駐車場	平地	浸透域(大)	浸透域(大)

表4 流域タイプ毎の面積と割合

	単位	総面積	不浸透域		浸透域		
			屋根	平地	小	中	大
タイプ1	:m ²	203500	59722	113501	27597	2680	0
	:%	100.0	29.3	55.8	13.6	1.3	0.0
タイプ2	:m ²	203500	59722	90829	27597	2680	22672
	:%	100.0	29.3	44.6	13.6	1.3	11.1
タイプ3	:m ²	203500	59722	34677	27597	56153	25352
	:%	100.0	29.3	17.0	13.6	27.6	12.5

4. 管渠計算手法

MOUSE管内水理モデルは、自由水面を持つ流れと圧力流れとが交互に入れ替わる排水ネットワーク内の非定常流れをシミュレーションする。計算には、1次元の自由水面を持つ流れ方程式(サンブナン法)の陰型式差分値解法を採用している。

圧力流れの計算は、管渠の天端の狭い『スロット』を設けることにより簡単に求めることができる。このように、自由水面を持つ流れも圧力流れも同じ基本式で表現することができるため、全ての位置において滑らかで安定した計算結果を得ることができる。

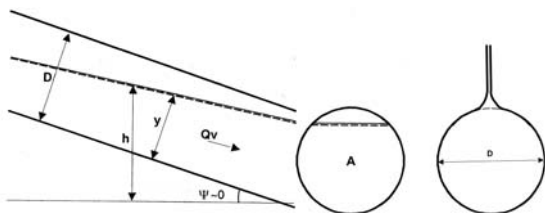


図3 管渠計算のイメージ(左)と仮想スロットを備えた管路(右)

マンホールおよび管渠のデータは、名古屋市上下水道局の配管図をもとにMapinfoにて作図して、取得した位置情報をMOUSEに入力した。その状態を図4に示す。

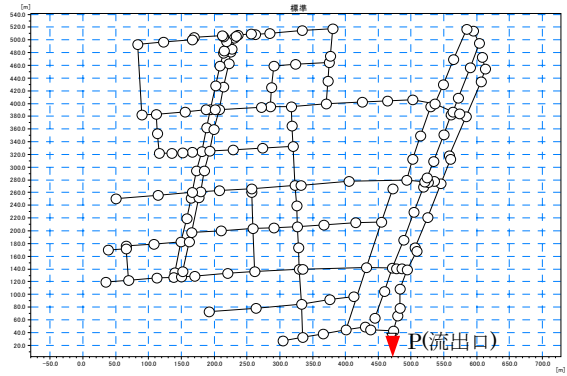


図4 ネットワークデータ (MOUSE)

5. 採用降雨

本研究では、河川計画上での使用例も多く、名古屋市雨水流出抑制施設設計指針でも採用されている、中央集中型降雨波形を採用した。降雨強度式は名古屋市雨水流出抑制施設設計指針に従い、君島型の降雨強度式が用いた。また、降雨継続時間は1時間とした。

$$\text{君島型：降雨強度式} \quad r = \frac{a}{t^n + b} \quad \dots (6)$$

r : 降雨強度 (mm/hr)

t : 降雨継続時間 (m)

n, a, b : 定数

名古屋市における降雨強度式の確率年毎の各定数を表5に示す。

表5 確率年に対する定数

確率年	n	a	b
3	0.72	1112.7	6.079
5	0.74	1547.1	8.805
10	0.75	2095.0	11.717

本研究で採用した降雨形態を図5に示す。また、総雨量は3年確率降雨で44mm、5年確率降雨で54mm、10年確率降雨で63mmになる。

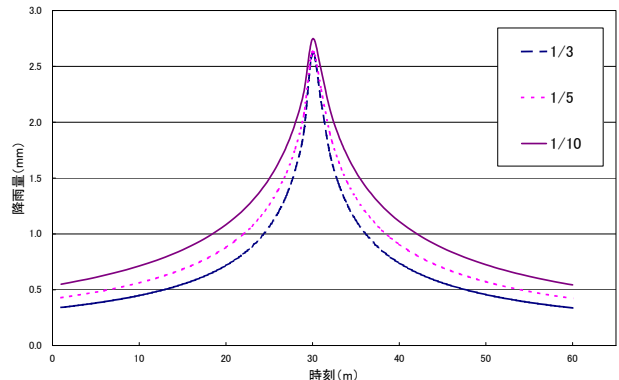


図5 降雨曲線 (降雨継続時間1時間)

6. シミュレーション結果・考察

MOUSEにより、流出計算と管渠計算を行った。流出計算では、図6で示した降雨を採用し、計算時間は降雨終了の4時間後（降雨開始より5時間）まで行った。これは、降雨終了後の流量の変化を見るためである。

始めに、浸透域の違いによる、流出の変化を表6にまとめた。降雨量=初期損失+浸透損失+End Volume+流出量が成り立っている。

表6 流域タイプ別・流出計算結果

タイプ1	降雨量	初期損失	浸透損失	End Volume	流出量	流出率
1/3	8514.4	29.6	118.6	270.1	8096.1	0.95
1/5	10086.8	29.6	140.5	270.1	9646.6	0.96
1/10	12115.4	29.6	168.8	270.1	11646.9	0.96

タイプ2	降雨量	初期損失	浸透損失	End Volume	流出量	流出率
1/3	8514.4	25.2	1085.3	229.6	7174.3	0.84
1/5	10086.8	25.2	1285.7	229.6	8546.2	0.85
1/10	12115.4	25.2	1544.3	229.6	10316.2	0.85

タイプ3	降雨量	初期損失	浸透損失	End Volume	流出量	流出率
1/3	8514.4	14.0	3567.3	125.9	4807.2	0.56
1/5	10086.8	14.0	4226.1	125.9	5720.9	0.57
1/10	12115.4	14.0	5076.0	125.9	6899.5	0.57

全体を通し、浸透域が大きくなるにつれて流出量が減少していることが分かる。まずタイプ1とタイプ2を比較する。歩道と駐車場の面積は流域の約11パーセントを占めており、そこを浸透域に改善することで流出率が約9パーセント小さくなることが分かった。タイプ3での浸透域は流域全体の約54パーセントを占めている。そのためタイプ1と比較し、流出量を大幅に小さくすることができた。

次に、図6に流域改善による流出口Pの流量の変化を示す。浸透域が増加すると、ピーク流量を低減させることができる。中でも、タイプ3（流域の約54パーセントが浸透域の場合）では、その効果がよく理解できる。

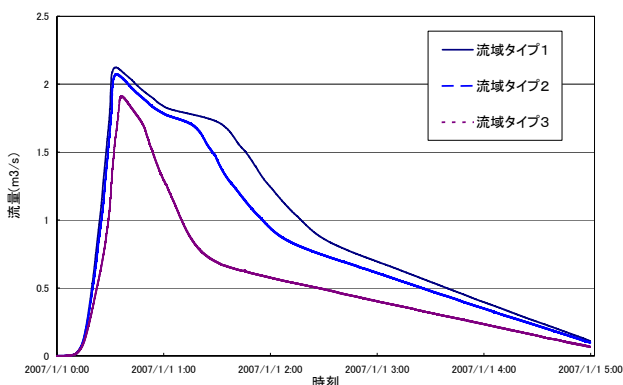


図6 流域の改善による流出比較（3年確率降雨）

続いて、貯留施設を組み込んだ場合の流量の違いを比べる。一般的に貯留施設を設置する場合、ピーク流量を低減させ、ゆっくりと放流することを目的としている。

本研究での貯留施設は、各戸貯留をイメージしており、大規模な貯留施設を想定していない。そこで、屋根域を含んでいる流域が接続されているマンホールを、貯留施設に置き換え、所定の貯留量が満たされるように、その大きさを定めた。本研究では、屋根面積100m²あたり0.25m³の貯留を行うことにした。

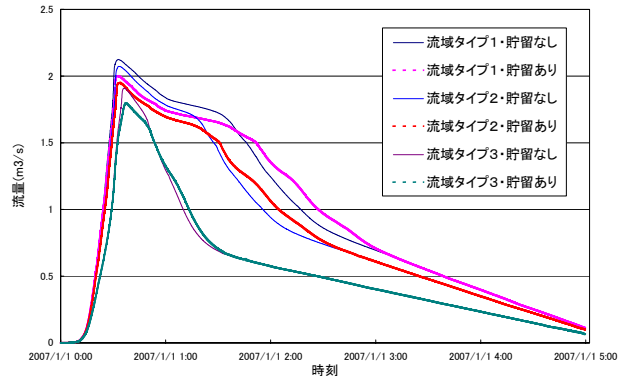


図7 貯留施設の有無による流出比較（3年確率降雨）

図7では、各流域タイプに貯留施設がない場合（現況）と貯留施設を設けた場合の流出を比較した。貯留施設を設けたことで、ピーク流量を低減させることができ、流出の遅れも発生していることが確認できた。しかし、ピーク流量への到達時間を大幅に遅らせる効果は小さかった。これは、想定している貯留施設が大規模な施設でなく、各戸貯留を想定しており、貯留量も大きくないことに起因するのではないかと考えられる。名古屋市雨水流出抑制施設設計指針によれば、100m²当たり4m³の貯留・浸透を行うとしており、本研究で検討している貯留量の約16倍に相当する。これは、名古屋市指針では大規模な貯留施設や浸透施設を複合的に設置させることで、100m²当たり4m³を満たすことにしているからである。

7. まとめ

本研究では、浸透域が増えた場合と、貯留効果が見込める場合を分けて検討した。浸透の効果にかんして、歩道や駐車場の改善よりも、宅地を改善した方の効果が大きいことが分かった。これは人口が集中している地域に言えることであり、都市化された地域に通じるであろう。また、貯留効果にかんしても名古屋市の指針よりも小さな規模を想定したが、それでも貯留効果を確認することができた。これより、各戸貯留による流出抑制が効果的であることが言える。これからの治水対策は、行政のみが対策を講じるのではなく、流域に住む人々が、協力意識を持って、行政と一体となって対策を講じることが、最も効果的であることが言える。