

1.はじめに

近年、特に都市部で洪水・浸水被害が多発している。これは、都市化による不透透性地表の増加等の原因によるハイドログラフの先鋭化、ピーク流量時間の短縮によるものと考えられる。しかし都市部では、これら被害についての対策をするための河道掘削や河道拡張をするだけの土地余裕がないことが多い。このような背景により、近年ではこのような都市型水害の流出抑制対策として貯留施設や浸透施設などの雨水流出抑制施設の導入が進められている。本研究では流出抑制施設の配置状況が雨水流出に及ぼす影響について検討した。検討方法としては、従来から用いられている合理式や貯留関数法といった流域を統合的に扱う概念的集中型モデルではなく、流域を物理現象の側面から表現できる分布型モデルを用いる。本研究ではこの分布型モデルを構築し、実流域に適用することを第一の目的とする。その後、モデルを拡張し雨水流出抑制施設を組み込み、その流出抑制効果について検討を行った。

対象とする流域は、愛知県名古屋市内を流下している天白川下流の支川、扇川流域である。扇川は流域面積約 30km²、延長 9.8kmの都市小河川である。扇川流域は昭和 40 年以降、名古屋市のベッドタウンとして大規模な宅地開発が行われ、現在では流域の 60%以上が宅地化されている。このような急激な都市化が要因となり、浸水や内水氾濫などの被害が発生している。平成 3 年には本流域で大規模な集中豪雨があり、これらの被害による教訓より、本流域では多数の流出抑制施設の設置が多数行われている。本研究ではこの流域を対象として分布型モデルを構築した。

2.分布型モデルの構築

本研究で構築するモデルは、流域地形の数値表現、単位斜面流の追跡計算、有効降雨モデル、の 3 つの部分からなる。その構造を図-1 に示す。流域地形の数値表現では、GIS の階層構造を用いて流域の分割と擬似河道網の構築、および土地利用状況などの各種流域情報の管理を行う。単位斜面流の追跡計算では、単位斜

面内の雨水の流れを表現する基礎方程式を差分法によって解き、それを擬似河道網に沿って上流から下流まで逐次計算することで流出過程を再現する。その際、斜面や河道の浸透などの情報をあらかずモデル定数が、流域地形情報から同定される。有効降雨モデルでは蒸発散や窪地貯留、局所的な浸透による降雨の損失分を損失降雨とし、実降雨から損失降雨を差し引いた値を有効降雨としてモデルに取り込む。

単位斜面からの雨水流出を表す基礎方程式には中間流・表面流統合型 kinematic wave モデルを用いる。連続式は式(1)で与えられる。

$$\frac{\partial H(X, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(X, t)}{\partial X} = r_e(X, t) \cos \theta, \quad 0 \leq X \leq L \quad (1)$$

ここで X は斜面上端からの距離、 t は時間、 B は斜面幅、 $H(X, t)$ は流れ方向に垂直に取った実質の水深、 $Q(X, t)$ は単位幅あたりの流量、 $r_e(X, t)$ は有効降雨強度、 θ は斜面勾配、 L は流下方向に計った斜面長である。また、運動方程式は式(2)で与えられる。

$$Q(X, t) = \alpha H(X, t)^m \quad (2)$$

と m は流れの特性により決まるモデル特有のパラメータであり、表面流・中間流を同時に考慮する場合、

$$H \leq d \quad Q = \frac{k \times \sin \theta}{\gamma} H \quad (3)$$

$$H > d \quad Q = \frac{k \times \sin \theta}{\gamma} H + \frac{\sqrt{\sin \theta}}{n} (H - d)^{5/3} \quad (4)$$

として与えられる。ここで、 n は Manning の粗度係数、 k は飽和側方透水係数、 θ は A 層での有効空隙率、 d は実質の A 層厚を表す。この基礎方程式を陽解法では Lax-Wendroff スキーム、陰解法では四点陰解法スキームを用いて差分化しその解を比較した。両差分スキームを用いて比較したところ、より安定的な解を得

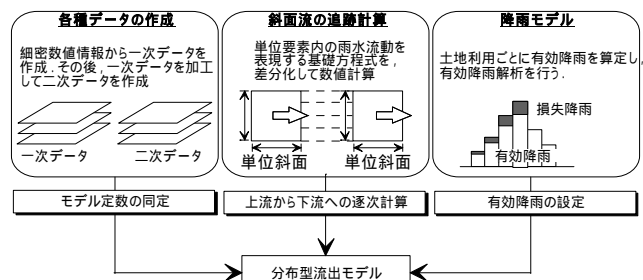


図-1 分布型モデルの構成

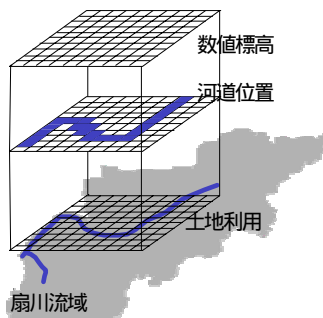


図-2 流域地形の表現方法

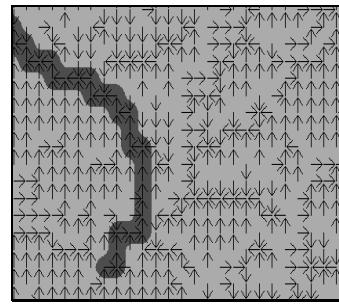


図-3 落水線の例

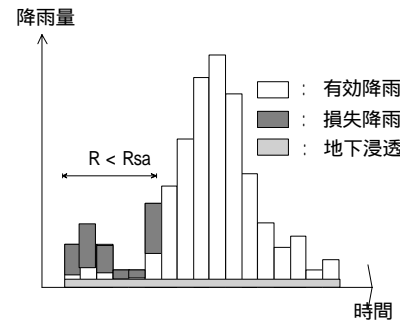


図-4 有効降雨モデル

られる四点陰解式スキームを本研究では用いることにした。

流域地形をモデル化するにはグリッドモデルを使用する。標高・土地利用などの基礎データは流域全体を10mメッシュで記録してある都市細密数値情報から取得し、これを50mメッシュへと変更して用いる。これらの情報を基に標高、土地利用、河道位置等、流域地形の表現に必要な基礎データを作成する(図-2)。なお、扇川流域全体では縦155×横183、合計28,365のメッシュで表現することとなる。その後、対象メッシュと周囲4方向のメッシュの標高値を比較しメッシュの斜面勾配を求め、対象メッシュから最も低いメッシュへと雨水が流下するものとし、落水線の方向を定める(図-3)。この落水線を有向グラフとみなし、流域最下流端から縦型探索の手法を用いて追跡することにより、流域全体を一元的に流出計算する。このとき、細密情報より作成した標高から求められる各斜面の流下方向をそのまま用いると、河道の上下流方向が実際と一致しない場合がある。ここではこの矛盾を、河道の流下方向を別枠として規定しモデルに取り込むことで解決している。また流域斜面においても、落水線のループや局所的な窪地が流出計算に不都合となるので、その都度検出し補正を行った。

降雨流出系の現象では、流域への降雨量がそのまま河川に流入してくることはない。浸透性地表面では、その地盤特性に応じて降雨の何割かが地中へと浸透し、河川へ流出せず、また不浸透性地表面でも流域が局所的に窪地になっている個所で雨水が貯留されることにより、河道への流入が遅れてくることがある。これらの損失を取り込むモデルとして、有効降雨モデルがある。単位流域内で直接流出せずに流域内で留まる雨水を損失降雨とし、実降雨から損失降雨を割り引いて考

え、その差を実質的に有効となる降雨として考える。この雨量の分離作業を有効降雨解析と呼ぶ。本研究では有効降雨モデルとして、単位斜面における土地利用ごとに損失降雨を評価することのできる $f_1-R_{sa}-f_{sa}$ モデルを用いる。本モデルの概念について図-4に示す。また、本モデルで使用する有効降雨の算定式は、

$$R \geq R_{sa} \text{ のとき } R = R \times f_1 \quad (5)$$

$$R < R_{sa} \text{ のとき } R = R \times f_{sa} \quad (6)$$

である。ここで、 R : 実降雨、 R_{sa} : 累積降雨、 f_1 : 初期流出率、 f_{sa} : 終期流出率を表す。式(5),(6)より、累積降雨がある一定の値になるまでは f_1 を使用し、累積降雨が R_{sa} を越えた時点で f_{sa} の値を用いるといったように、総降雨量に応じて損失降雨の量を変化させている。 f_1, R_{sa}, f_{sa} は土地利用ごとに異なった値が用いられ、これにより各单位斜面における有効雨量を算出する。また、浸透性地表面をもつ斜面では降雨時間に関係なくある一定の強度で地中へと浸透していく成分が存在すると仮定し、山地、畑地・水田についてはそれぞれ4.0mm/hr、2.0mm/hrの地下浸透成分を見込んである。以上、流域地形を表現するデータを統合し、流出計算可能なデータセットへと変換を行った。

3.モデル定数の決定

次に流域特性をあらゆる粗度係数を、流域での観測流量とモデルでの計算流量を比較することにより決定する。図-5に流域内で雨量を観測している緑土木事務所、および鳴海水位観測所の位置を示す。設定する定数は流域である確定した値を持つわけではなく自然条件によって変化するので、参考資料に提示されている定数値を参考としながら感度分析を行うことにより最適なモデル定数を決定する。対象降雨の降雨特性がモデル定数に与える影響を少なくするため、同時に3降雨に対してモデル定数の決定を行い、各降雨で決定さ



図-5 各観測所の平面位置

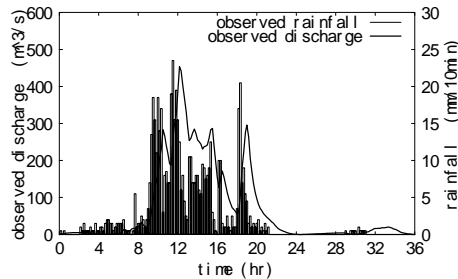


図-6 rainfall-1の降雨強度と観測流量

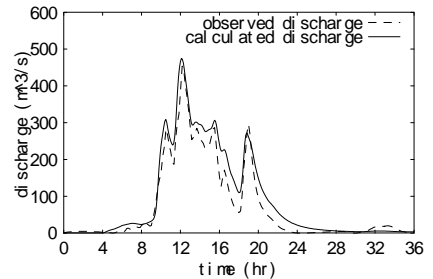


図-7 rainfall-1 粗度係数同定結果

れた定数の平均を持って対象流域でのモデル定数を代表させることとする。図-6 に例として対象降雨の1つである rainfall-1 を挙げる。rainfall-1 では2000/9/11～9/12 までの36時間の10分雨量を対象としている。本対象降雨の最大降雨強度は141mm/hr、総降雨量は647.0mmの単峰性の降雨である。本降雨を用いて粗度係数に対して感度分析を行い、観測流量と計算流量が最も一致した際の結果について図-7 に示す。図-7のハイドログラフより、低減部分での適合性が若干悪い結果となっているが、ピーク流量および立ち上がり部分については精度よく表現できていることがわかる。よって、この際の粗度係数を流域固有の係数として設定する。

粗度係数と同様に中間流の特性を定義するA層厚、側方透水係数についても感度分析を行ったが、その設定値の違いによる差異はあまり見られなかった。よって本研究では一般的に用いられている定数のうち、その平均値であるA層厚20cm、側方透水係数5.0cm/secを定数として設定した。

4. 流出抑制施設の組み込みと結果

次に分布型モデルへの流出抑制施設の組み込みを行う。本研究では流出抑制施設を浸透施設と貯留施設に分け、双方において検討を行う。

4.1 浸透施設の空間配置 扇川流域の不浸透性地表に浸透施設を配置した際の影響について解析を行う。浸透施設のモデル化では施設の設計に用いられる技術指針に従って浸透施設の浸透強度を決定し、土地利用ごとに1メッシュにおける浸透強度を算出した。算出した浸透強度を有効降雨モデルの地下浸透と同等とみなし、施設の配置効果を土地利用ごとに有効降雨モデルに取り込むことでモデル化を行った。各対象降雨に対して、浸透施設設置率が0～100%まで、25%刻みで施設を流域一様に整備したときの流域下流端での流

量を図-8 に示す。ここでは定常状態での浸透施設の効果について示すため、24時間一様の降雨を用いている。図-8より浸透施設の設置率が上がるほど流量が低減され、降雨強度が大きくなるとその設置効果が低くなる様子がわかる。

次にこれら流域一様配置を基準とし、設置率を空間的に変化させた時の影響について検討を行う。方法としては、落水線図を利用して対象流域を最下流点からの雨水流下距離別に上・中・下流域に分割し、それぞれの分割流域ごとに整備率を変化させる。これにより施設の空間的な配置の違いを表す。ここで各流域をA:下流、B:中流、C:上流とし、識別を行うことにする(図-9)。この際、平均設置率を一様配置と同じにすることにより、全域では同じ設置率でありながらその空間的な配置のみが異なる分布を得ることができる。これらを比較することにより、浸透施設の空間配置が流出計算に与える影響についての検討を行う。その結果の一例を図-10 に示す(左:平均25%,中:平均50%,右:平均75%)。ここでは流域最下流端での偏差配置流量と一様配置流量との差を示しており、プラスでは一様配置よりも流出量が多く、マイナスでは一様配置よりも流出量が少なくなことを意味している。この図より、平均設置率によりその影響度合いが異なるが、配置による流量差は多くて4.0m³/sであり、かなり小さくなっている。また流量に対する割合で考えると降雨強度が大きくなるほどその割合は小さくなり、洪水流出などの際には施設の空間配置は無視することができるといえる。

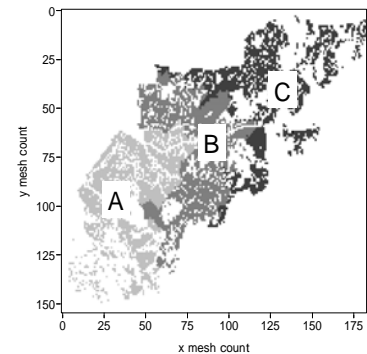


図-9 流域区分

4.2 貯留施設 扇川流域に実際に設置されている貯留

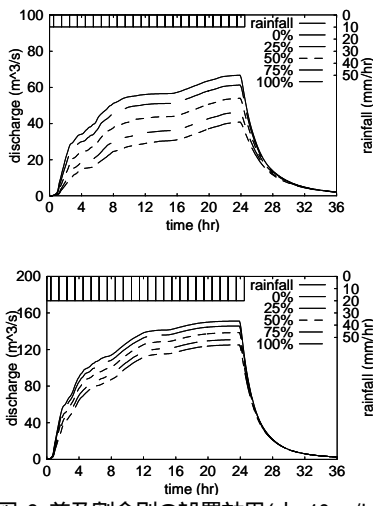


図-8 普及割合別の設置効果(上:10mm/hr,下:20mm/hr)

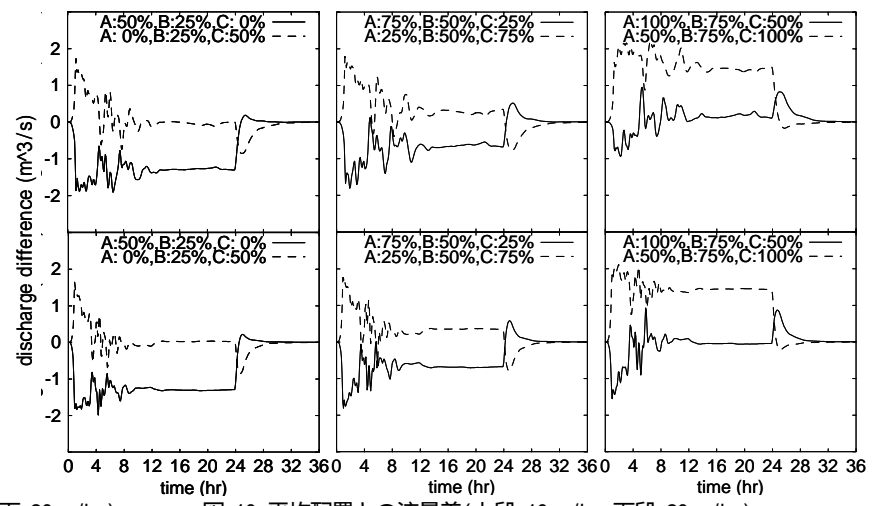


図-10 平均配置との流量差(上段:10mm/hr,下段:20mm/hr)

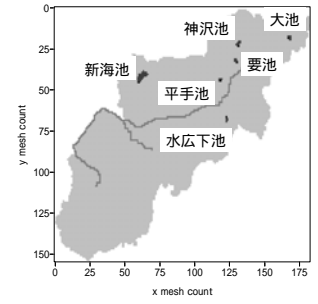


図-11 貯留施設の配置図

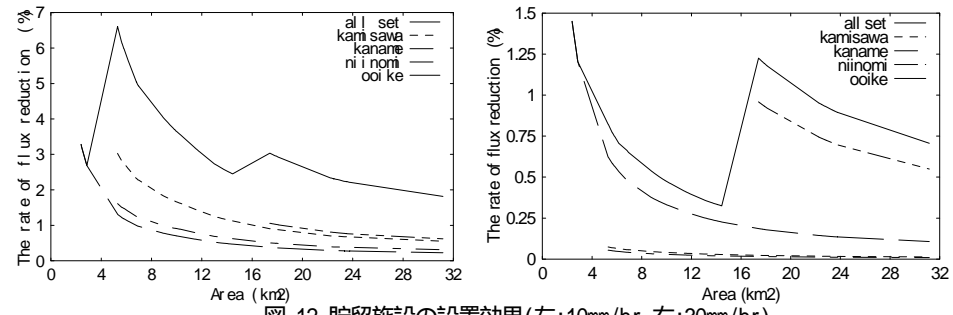


図-12 貯留施設の設置効果(左:10mm/hr,右:30mm/hr)

施設のうち図-11 に挙げる 6 施設を対象にモデル化を行った。想定降雨は浸透施設の際と同様である。施設のモデル化では、式(5)の連続式を四次のルンゲ・クッタ法を用いて解き、全ての施設の放流口形状を越流型と仮定して式(6)で与える。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{A} \quad (5)$$

$$Q_{out} = C \cdot L \cdot h^{3/2} \quad (6)$$

ここで、h:施設内での水深 (m), Q_{in} :施設への流入量 (m^3/s), Q_{out} :施設からの流出量 (m^3/s), A:施設の面積, C:流量係数, L:放流口幅(m)である。貯留施設についてこれらモデル化を行い、各対象施設の設置の有無が河川流量に与える影響について検討を行う。分布型モデル上で扇川と判定されたメッシュにおける流量時系列を抜き出すことで河川流量の比較を行った。対象とした施設のうち効果が非常に小さい2施設を除いた4施設の結果について図-12 に示す。縦軸には施設を設置しないケースを基準としたピーク流量低減率を、横軸には落水線より求めた各河川メッシュに接続する流域面積、つまり集水面積を示す。ピーク流量低減率とは、全ての施設が設置されない場合に比べて施設を設置することにより低減されるピーク流量の割合を示し、この値が0に近づくほど設置の効果が低くなるこ

とを示している。図-12 ではそれぞれの施設が河川の任意の地点に対してどの程度の効果を発揮するかを示している。図-12 では施設から河川へと流入する地点がそれぞれ違うため、施設によってその始点が異なっている。個別の貯留施設の効果についてみると、施設の設置点直下でその効果が最大となり、集水面積が広くなる、つまり下流に行くにつれて貯留施設の効果が小さくなっていることがわかる。以上より、施設の設置効果はその設置の設置位置に大きな影響を受けるため、その空間配置が河川流量に与える影響は大きいと考えることができる。

5.おわりに

本研究では扇川流域を対象として分布型モデルを構築し、モデル定数を同定することでモデルの有用性を示した。またモデルに雨水流出抑制施設を組み込むことにより、その配置が河川流量に与える影響について示した。その結果、浸透施設ではその空間配置は問題とならなかった。しかし貯留施設では空間配置による影響が大きいことが示された。今後は貯留施設を対象とし対象流域や対象降雨を増やし、その効果についてより詳細に検討を行う必要がある。

【指導教官】 富永晃宏 教授