

都市中小河川・下水道の連携した治水計画 —台地部既成市街地を対象として—

谷岡 康¹・福岡 捷二²

¹正会員 工博 パシフィックコンサルタンツ (株) 水工技術本部 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿 2-7-1)

E-mail: yasushi.tanioka@tk.pacific.co.jp

²フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻

(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: sfuku@hiroshima-u.ac.jp

都市域の河川・下水道の流出・氾濫は相互に関連し合う治水システムであり、その浸水被害を全体として最小限にするためには、超過洪水に対する危機管理施策を事前に講じておくことも必要ではあるが、毎年の様に発生する都市型水害に対して、河川、下水道の整合のとれた治水計画における連携が目前の最重要課題であり早急に進めなければならないことと考える。本文は、下水道が整備され河川へ自然排水される様な台地部の都市域中小河川・下水道流域を対象として、下水道と中小河川で一般的に用いられる合理式に基づく各々の計画で進めている治水計画の現状に対して、降雨・流出特性の実態整理や具体的・実際的なケーススタディを通して問題点を示し、合成合理式等の下水道小流域の流出を考慮出来る流出解析手法を用いた河川・下水道の連携した治水計画を行う方法を示し、今後の課題を明確にする。

Key Words : *flood control measures in urban area, coordination of rivers and sewers, torrential rainfalls, composite rational method*

1. はじめに

近年流域の市街化が進み、流出の速く大きくなってきた都市域の中小河川・下水道では、局所的な集中豪雨により、いわゆる都市型洪水の被害が毎年のように発生している。

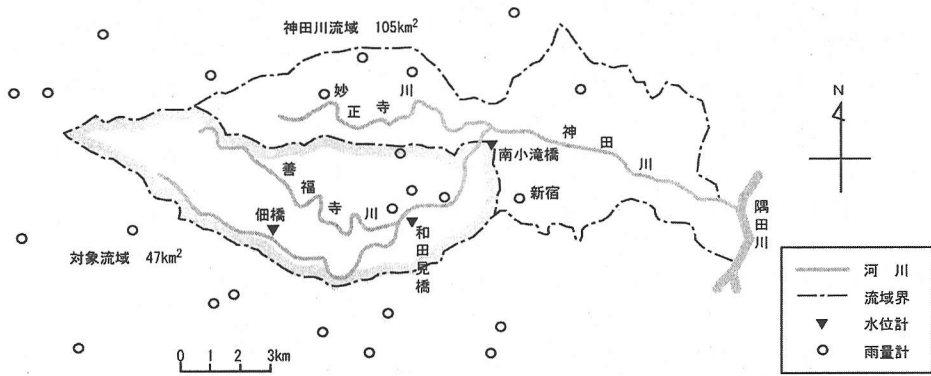
本論文は、下水道施設が整備され速く大きな流出が河川へ自然排水される台地部の既成市街地を対象としている。台地部の都市型水害の特徴として、中小河川の流出、氾濫形態が、下水道の流出・内水氾濫によって大きく左右されていることが挙げられ、河川、下水道施設の流出量の見積もり、整備レベルのバランスをいかにとるか、いかに連携を図るかが、全体としての被害を低減するための重要な課題と言える。また都市域では下水道の流出量が、きわめて速く大きくなってきており、流域内の下水道流出の重なり方で河川流量が大きく異なるので、治水計画で一般に用いられてきた合理式が実態と合わない不具合が生じてきている。その意味で下水道・河川での治水対策における整合と連携が、特に重要となってきていると考える。

現在の河川と下水道の管理分担区分についての通達¹⁾(昭和47年、建設省)によると、河川・下水道の流域面積の境は原則として2km²とされている。これが下水道の排水

区単位の目安となろう。これに対し中小河川の流域スケールは概ね200km²未満²⁾が目安となっており、各々で合理式により治水計画がなされているのが現状である。

下水道における雨水排除計画は、「下水道施設計画・設計指針と解説」³⁾に従い行われてきた。ここでは合理式を原則としており、その施設整備の確率率は5~10年とされている。一般に下水道の施設は、市街地の雨水をすみやかに域外へ排除する施設として設計され、治水安全度が河川より小さいことには留意されるが、その排水先である河川での現象は考慮されていない。

下水道の最近の流出解析には、海外で開発された汎用モデル⁴⁾が用いられるようになり、下水道幹線のみならず枝線までの細かな水路網を解析的に計算出来る様になってきている。また、近年では例えば肱岡ら⁵⁾による細密な下水道施設データベースを用いて、容易に細かに解析出来、下水道枝線網についての弱点やマンホールからの溢水箇所についても解析出来るまでにいたっている。しかし、現状においては河川との接続箇所における河川水位と下水道排水量の関係や、内水による地表氾濫流と河川溢水氾濫流との相互の影響、施設能力を超える規模の洪水に対して河川も含めた総合的な被害の評価等についてを雨水排水計画にまで反映されるところまでには至っていない。



(a) 神田川流域図²⁰⁾



(b) 下水道雨水排水区 (河川吐口単位) の概況

図-1 東京都神田川及び下水道流域図

中小河川の治水計画は、「改訂 建設省河川砂防技術基準 (案) 計画編」⁶⁾に基づいて行われてきている。ここでは、「100km²~200km²の中小河川では、合理式を用いて計画が行われていることが多い」とされている。中小河川の計画においては、今まで雨量、水位の記録が細かに得られず、また下水道流域の流出形態を細かに把握出来なかったことも一因として、計画上の流量は便宜的に合理式を用い見積もられてきた。

都市中小河川の流出に関する研究は、その市街化による影響を予測することを目的に古くに行われてきた。しかし、多くの研究は、今日までの市街化が進んだ状況でなかったこと、雨量や水位の記録が時空間的に密に得られなかったことにより、市街化による流出特性の変化は想定域を出ていない。一般に、都市化された流域は、様々な下水道施設の整備、不浸透域・浸透域の混在等から複雑な排水システムを形成しており、この流出を再現するモデルとして、山口ら^{7)~9)}の修正 RRL 法、橋本・長谷川¹⁰⁾の準線形貯

留型モデル、和泉・吉川¹¹⁾の修正 RRL 法と貯留関数法を組合せる方法等、様々な非線形的手法が検討され、これらを用いて市街化の影響量が検討されているが、決定的方法は得られていない。また、現在の極度に市街化の進んだ流域に対しての検証を行った例は少ない。

著者らは、東京都で得られた密な雨量・水位データをもとにして、都市中小河川流域スケールでの降雨の時空間的な分布・変動の特性^{12)~15)}及び狭小域の降雨とその流出の線形的な関係^{16)~18)}をもとにして、降雨の時空間的な分布や変動を細かに流出に反映できるように小流域毎の合理式による流出流量を重ね合わせる線形モデルを構築し、その再現性を示し、都市中小河川の流出の実態と特性を、特に降雨の地域分布との関係で明らかにしてきた^{19), 20)}。

また、都市中小河川流域規模での時々刻々の降雨の空間分布の不均一性が流出に与える影響を検討し、合理式の適用範囲については、特に雷雨性の降雨に対して、せいぜい流域面積 5km²までと考察している²⁰⁾。

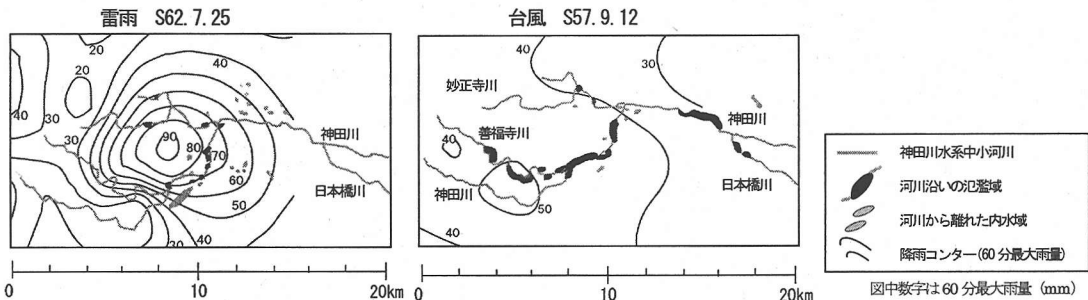


図-2 降雨要因と浸水実績¹⁹⁾

本論文は、都市化の進んだ台地部既成市街地での中小河川・下水道を対象に、いままでの合理式で考えてきた計画流量と、合成合理式を用いた下水道の小流域の速く尖鋭な流出が重なりあう場合の流出量の違いをケーススタディにより示し、河川・下水道の連携した治水計画を行うための流出解析手法についての要件を示した。また集中豪雨など実績の降雨の時空間分布を与えた場合の検討事例を通して、今後の中小河川・下水道の連携した治水計画を行う上での留意点、課題について考察した。

2. 台地部中小河川・下水道の降雨・流出・氾濫特性

(1) 台地部の中小河川・下水道の流域スケール

本論文では図-1(a)に示す東京の代表的な都市中小河川である神田川流域のように、台地部にある都市域の中小河川と下水道を対象としている。台地部の都市流出の特性として、下水道の流出量が、低地部ではポンプ場などにより強制的に排水されるのに比べ、下水道施設能力に見合う流量が河川に自然排水されることにある。

図-1(b)に神田川の中・上流部(約50km²)の河川への下水道吐口による排水区界を示す。下水道流域は、河川流域のスケールより小さく、3つの幹線以外は、2km²以下となっている。これら大小含めた下水道流域からの流出のタイミング、重なり方が河川の流量ハイドログラフを規定することとなる。

(2) 降雨要因と浸水被害

近年の都市部の洪水被害は、主に台風性豪雨によるものと雷雨性の集中豪雨によるものとに分けられる。図-2には、神田川での雷雨、台風による実績の浸水範囲を示す。雷雨性豪雨では短時間雨量が卓越し下水道施設が排水しきれずに、河川から離れた部分での内水被害が顕著である。これに対し、台風では短時間の降雨強度が比較的小さいため、下水道から順調に河川へ排出され、河川沿いでの溢水氾濫が顕著となっている。この様に降雨要因によって異なる

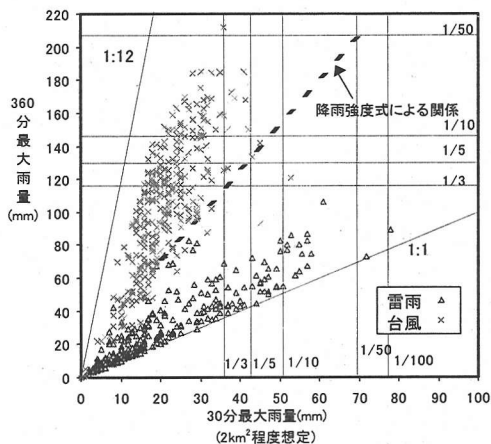


図-3 降雨要因と短時間雨量

る流出・氾濫形態を示すが、下水道施設が整備された既成市街地での都市型水害の特徴といえる。

図-3に東京都神田川流域内で浸水被害の発生した10の降雨(雷雨5降雨, 台風5降雨)時の東京都内に複数設置されている降雨観測所での10分雨量記録から、横軸に下水道の排水区2km²相当での流達時間とした30分での最大雨量、縦軸に河川での200km²の流域面積を想定したおよその到達時間360分(6時間)程度とした場合の最大雨量の関係を示した。台風性と雷雨性の降雨要因による到達時間内雨量の関係は、明確に分かれることがわかる。

この様に実際に浸水被害をもたらす降雨の時間分布は、降雨要因により特徴的であり、この降雨外力の特性により図-2に示す様な浸水被害の特性も左右されることとなる。図-3中に点線で示しているのは、確率規模毎の降雨強度曲線から求めた30分、360分雨量の関係であるが、台風性降雨と雷雨性降雨の分布の間で台風よりに位置している。降雨の実態としてはこの30分、360分雨量が同時に生起することはまれであろうことが推定される。

この様に降雨要因、降雨の時空間分布特性により、流出や内水・外水の氾濫特性も、様々な様相を呈しているの

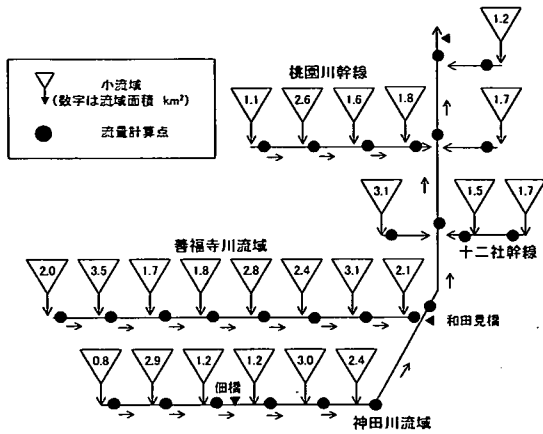


図-4 洪水解析モデル (合成合理式)²⁰⁾

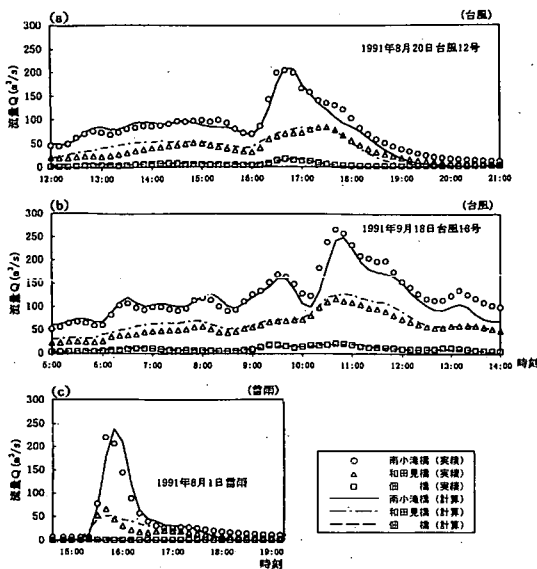


図-5 実績洪水の再現結果²⁰⁾

治水対策においてもこれら実際の降雨の時空間分布に対応する計画が重要となると考えられる。

(3) 都市中小河川の流出の再現性

著者ら²⁰⁾は、図-1(a)で示す神田川南小滝橋上流(約50km²)を、図-4に示すようなおよそ1~3km²程度の小排水区で分割した合成合理式²⁾での実績洪水による再現を試みている。結果は図-5に示すように波形、ピークとも極めて良好に再現出来ることとなり、流域内の短時間(10分)降雨の地域分布の細かな反映と、小流域の流出量の線型的な重ね合わせにより対象域の流出現象を良好に再現出来ることを示している。ただし、この検討では下水道・河川の氾濫のない規模での洪水を対象としているため、内・外水の氾濫がある場合までの流出量は再現出来ない。

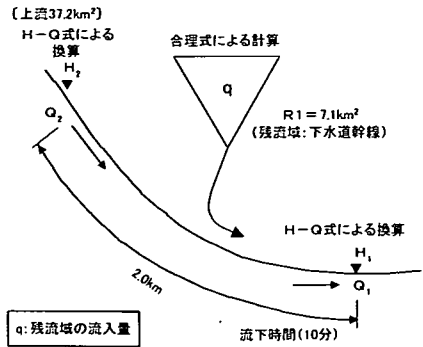


図-6 流出流量推定模式図²⁰⁾

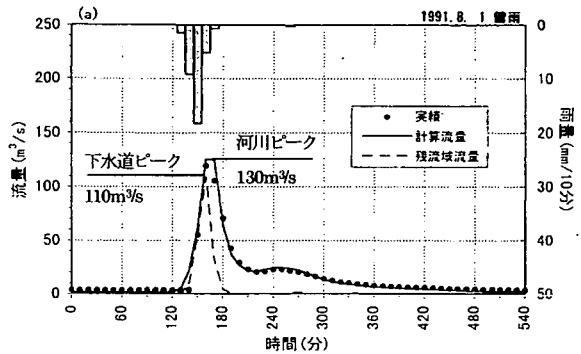


図-7 河川流量と下水道幹線流量²⁰⁾

(4) 下水道の流出の河川への影響

神田川の水位計が比較的近傍にあり、その間に下水道幹線が流入する区間を抽出し、下水道の流出形態を調べ²⁰⁾。検証は、図-6に示す模式図の様に、上流実績水位からH-Q式で換算した流量に残流域流出量を加えたものと、下水道幹線合流後の実績水位からH-Q式で換算した流量とを比較し再現性を調べている。残流域(下水道幹線)の流出量は、流域規模、下水道の流下時間等を考慮し、到達時間を30分と想定し、10分毎の降雨波形から30分間の移動平均降雨強度を求め、合理式により時々刻々の流出量を算定している。図-7に示す様に下水道幹線合流後の流量は良く実績値を再現している。これより下水道幹線の流出の仕方は、降雨波形に極めて線形的で尖鋭であり、下流流量のピークに大きく支配的となっていることが分かる。この雷雨性の降雨においては、洪水の立ち上がり部に近傍の下水道流域の流量が重なり、本川ピーク流量の約8割を支配していることとなる。

このことから、都市中小河川の流出量は下水道の速い尖鋭な流出量とその重なり方が大きく影響するので、この点を正確に把握することが、治水計画を行う上で重要であることが分かる。

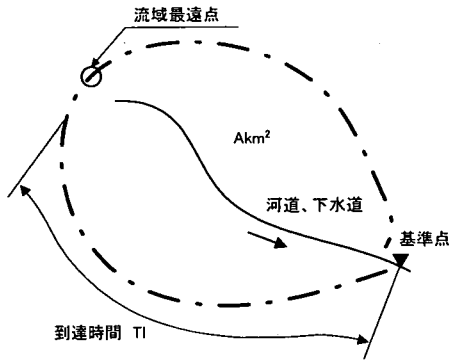


図-8 流域模式図

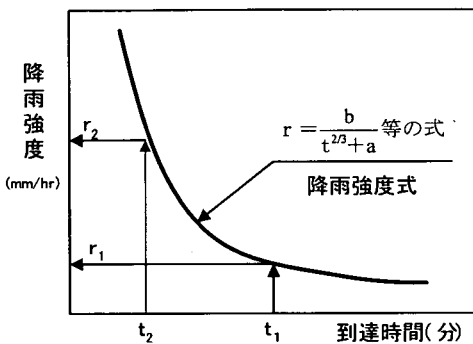


図-9 降雨強度式の概念図

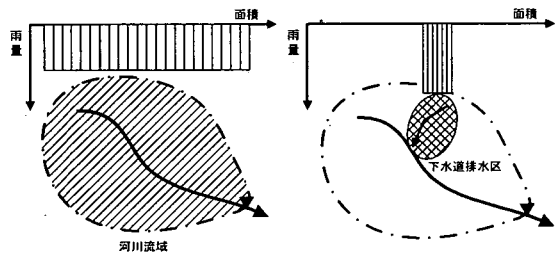
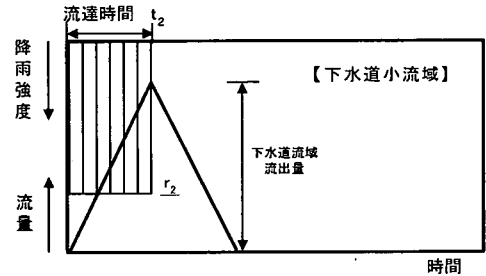
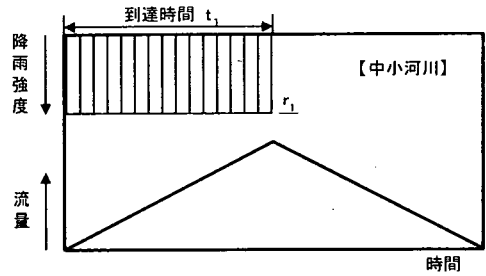


図-10 合理式の概念図

3. 治水計画における流出解析手法について

(1) 合理式による計画の現状と課題

a) 河川・下水道計画での合理式適用の現状

下水道では一般に管理区分界である 2km^2 以下の排水区に対して合理式に基づいて雨水排水計画が行われており、また流域面積が $100\sim 200\text{km}^2$ 以下の殆どの中小河川でも同様に合理式が用いられている。合理式においては、流域面積と流域最遠点までの到達時間だけで計画流量が定められるもので、下水道からの尖鋭な流出現象やその重なり方などは見込まれていない。

都市中小河川の流出形態は、小流域の短時間雨量に即応した直接的な流出²⁰⁾に支配され、流域途中の各小流域からの尖鋭な流出とその重なり方が直接的にピーク流量やハイドログラフを規定する流出形態で、流域が大きくなるほど合理式の仮定²¹⁾である“流域最遠点からの到達時間内降雨強度が時空間的に一定”が成立しないと考えられる。

b) 合理式的前提・仮定と課題

合理式では、図-8に示すように流出量を求める基準点からの上流域を一括した単流域とみなし、流域の最遠点からの到達時間に見合う降雨強度を用いて次式により算定する。

$$Q = \frac{1}{3.6} \cdot f \cdot r \cdot A \quad (1)$$

ここに、 Q ：流出量 (m^3/s)、 f ：流出係数、 r ：到達時間内降雨強度 (mm/hr)、 A ：流域面積 (km^2) である。

ここで到達時間内降雨強度は、実績の様々な継続時間の年最大雨量を用いて統計的に処理し、図-9に示す様な降雨強度式にあてはめたものを用いている。図-10に合理式概念を示す。中小河川においては、長い到達時間 t_1 による降雨強度が継続すると仮定している。また、下水道の小流域では t_2 の到達時間に見合う流出量のピークが算定される。ここでは基準点に対する上流域の降雨の一様性と

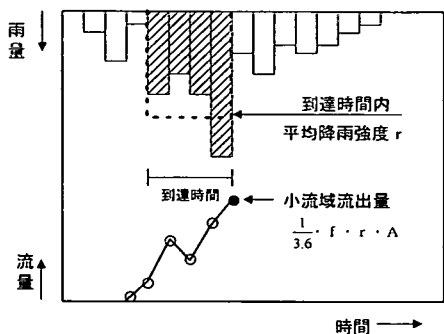


図-11 合成合理式の流出計算の概念

到達時間内の降雨強度の一樣性が重要な前提となっている。つまり下流河道の基準点では、継続時間の長く弱い降雨が流域全体に降った場合を流出量としている。

流域面積、到達時間が長くなる程、都市中小河川流域の小さな時空間スケールの降雨特性²²⁾からもわかるように降雨の時空間的な一樣性の前提が実態と乖離してくる。一方で、河川に流入する下水道の小流域では、図-10中・下段に示すように短い時間の強い降雨による尖鋭な流出を対象に計画される。ここで、下水道小流域と河川流域では、計画上考えている対象降雨(強度)が異なっていることになる。

合理式の仮定は、流域一律で、流域最遠点からの到達時間の間は一定の降雨強度が続くという前提であるが、到達時間や流域面積が長く、広くなる程その現実性が薄れる。合理式の適用範囲について検討された例は少なく、吉野²¹⁾は合理式の適用範囲は10km²以下が望ましいとしているが、明確な根拠については言及されていない。また著者ら²⁰⁾は、実績降雨の要因別の時空間的な一樣性から、雷雨性降雨でおよそ5km²、台風性降雨で30km²が限度であろうとしている。「中小河川計画の手引き」²⁾では、合理式の適用は50km²未満を目安としており、流域を細かに分割する合成合理式²⁾の概念をとりいれている。Viessman & Lewis²³⁾によれば、合理式の適用範囲を600acre(約2.4km²)以下としている例もあり、海外での合理式の適用範囲は極めて小さい。いずれにしても100~200km²の中小河川流域を一括流域で扱う合理式を実態としての流出計算に適用することは合理的でないと考えられる。

(2) 下水道流出の重なり方の河川流量への影響

a) 検討方法

本検討では、下水道の流入の仕方と重なり方による河川流量の差異や、降雨の時間分布、地域分布が河川流出量に

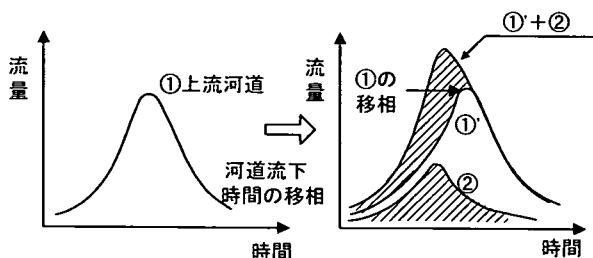
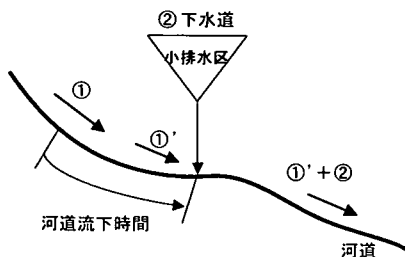


図-12 合成合理式の流出量の重ね合わせの概念



与える影響を調べるために、分割した各小流域の流出量を河道の流下時間で重ね合わせる合成合理式²⁾を用いて、河川の流出量が基準点上流を単流域と把える合理式とどの程度異なるかを試算する。

合成合理式は、まず対象流域を小流域に分割し、各小流域の降雨波形から図-11に示すように、時々刻々の到達時間内の移動平均降雨強度を算出し、合理式を用いて小流域の流出量を算出し、重ね合わせる方法である。図-12に示す様に①上流河道の流量を河道流下時間分移相させた波形①に②の下水道小流域の流出量を線形的に加えていく方法である。この方法は、降雨の時空間分布、下水道流出量の重なり方を考慮出来るものであり、前述のように氾濫のない範囲では台地部での都市中小河川での流出現象を再現できることが検証されている²⁰⁾。

本検討では、まずこの合成合理式と、合理式による流出量の差異をもとに、河川・下水道での治水計画における問題点・課題を明らかにする。

ここで検討に用いる降雨強度式は、東京都の中小河川で当面の計画として用いられている²⁴⁾3年確率(1時間当たり50mm)の次式を用いる事とした。

$$r = \frac{1100}{t^{2/3} + 6.5} \quad (2)$$

ここに r : 到達時間内降雨強度 (mm/hr), t : 到達時間 (分) (下水道では流達時間) である。

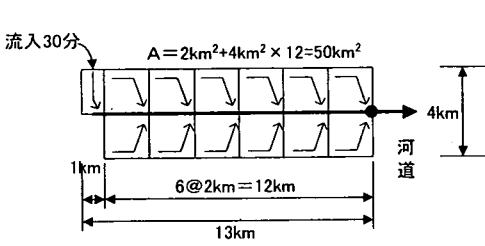


図-13 合成合理式モデル概念図

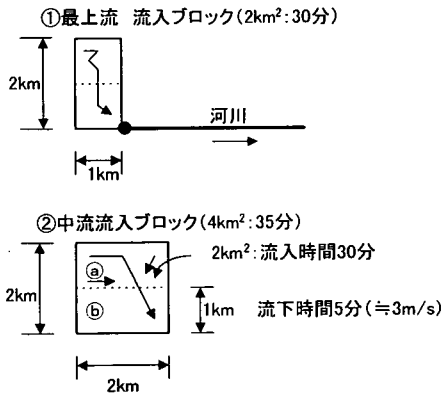


図-14 各小流域の流出条件の設定

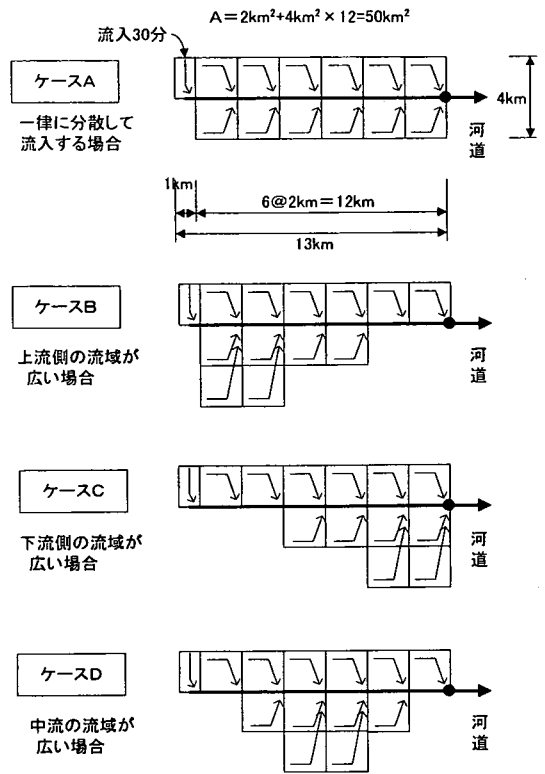


図-15 50km²の流域形状試算ケース

対象とする中小河川の流域面積は神田川の中上流の台地部を想定し 50km²とした。

合成合理式の解析モデルは、図-13 に示す様に 50km²の河川流域内を 4km² (最上流 2km²) の小流域 (下水道排水区) に設定した。ここで、流出係数は一般市街地を想定し $f=0.8$ ⁶⁾ とし、到達時間は、図-14 に示す様に、最上流の 2km²は河川の計画に用いられている“下水道整備区域の 2km²に対して 30 分の流入時間”⁶⁾を用い、河道の流下時間は、洪水の伝播する速度を約 3m/s と想定し、1km 相当の水路、河道に対して 5 分を与えるものとした。合成合理式においては、4km²単位の排水区も 2 分割し、最小流域単位を 2km²として 25 流域のモデルを作成した。ここで、このモデル流域での合理式に用いる最遠点からの到達時間は 90 分となり、そのときの到達時間内降雨強度は式(2)を用いれば、 $r=41.4\text{mm/hr}$ で、合理式によるこの 50km²流域の流出量は式(1)を用いて

$$Q = \frac{1}{3.6} f \cdot r \cdot A = \frac{1}{3.6} \cdot 0.8 \cdot 41.4 \cdot 50 = 460\text{m}^3/\text{s} \quad (3)$$

となる。これが通常の合理式による計画では河川の下流端の計画流量とされる。

b) 流域形状による流量の差異

図-15 に同じ 50km²の流域面積で、最遠点からの到達時間 90 分を同じくした、4 つの流域形状モデルを示す。

合理式においては流域の形状、例えば下流側が広い等の条件は考慮されないし、最遠点でない途中流域の下水道小流域の流出の状況、重なり方は考慮されない。つまりどの流域形状でも式(3)での 460m³/s が計画の流出量となる。

合成合理式に用いた中央集中型降雨波形は、図-16 の雨量グラフに示すようにピークを挟んだ到達時間内雨量強度を確率規模毎の降雨強度曲線による雨量と便宜上合わせた計画降雨波形であり、中小河川や下水道において、貯留施設を計画する場合にハイドログラフが必要とされる場合に用いられることが多い。

図-16 に図-15 で示すケース A から D までの流域形状によって、合成合理式を用いた場合にどの程度流量が異なるかを試算した結果を示す。この結果では、中流域、下流域に流域が広い場合に最も大きい流出量となる。これは、各小流域の尖鋭な流出と上流からの流量が、タイミングよく重なることにより大きな流量を示していると考えられる。流出量は、表-1 に示すように通常の合理式で与えられる計画流量に比べて約 2 割から 3 割増となることがわかる。これに比べて、流域形状による影響はおおよそ 1 割程度 (129% - 118%) となり、合理式を合成合理式とし小流域流出量の重なり方を考慮したことによる影響の方が大きい

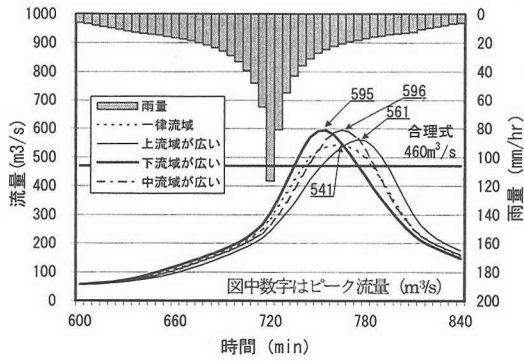


図-16 流域形状による流出流量の相違

表-1 モデル流域 (50km²) の試算結果一覧表

流域形状	ピーク流量 (m³/s)	中小河川合理式流量 460m³/s に対する比
A. 均一流入	541m³/s (561m³/s)	118% (119%)
B. 上流広い	561m³/s (570m³/s)	122% (124%)
C. 下流広い	595m³/s (614m³/s)	129% (133%)
D. 中流広い	596m³/s (613m³/s)	129% (133%)

() 内は、最小排水区 2km²の流入時間を 30 分から 20 分へ短くなったと想定した場合

といえる。

また表-1 の括弧で示しているが、下水道の小流域 2km²の流入時間が、通常河川で想定する 30 分⁶⁾ から 20 分と短かった場合については、さらに 2~4%ではあるが大きな流量となり、留意が必要であることがわかる。

c) 降雨の地域分布による流量の差異

降雨の空間的な偏差、流域に対する集中域が、流出量に与える影響を検討した。図-17 に示す様に対象流域内の降雨分布を上・中・下流の 3 ブロックに分けて、集中域には時間当たり 75mm/hr の降雨を与え、その隣のブロックでは 50mm/hr, 25mm/hr とし、比較のために流域平均としては 50mm/hr の降雨強度となるように調整した。この降雨分布は (後に示す図-26 の No.9 集中豪雨のように) ピーク雨量発生地域に対して 5km 程度離れると、その半分程度の雨量分布となる実績もあり、実際に起きうる集中豪雨の分布として想定される。

図-18 にその試算結果を示す。流域平均雨量としては合理式と同等の外力であり、合理式の場合に比べ 2 割~3 割の流出増となっている。また、流域一律のケースである 541m³/s に比べ、どの集中域のケースも、大きく計算され

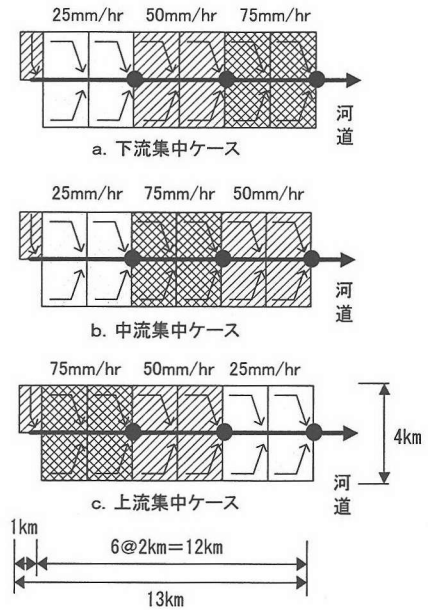


図-17 降雨の集中位置のケース

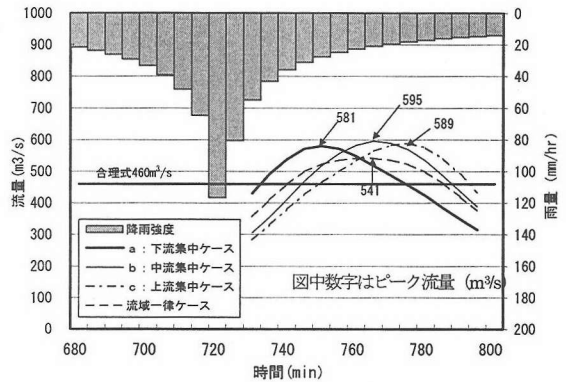


図-18 降雨集中域による流出流量の相違

ることとなる。これは、ひとつの集中域でほぼ同時に重なる下水道流量が大きい程、それが河川のピーク流量に効いてくるためと考えられる。降雨の集中域によっては、その流出流量、流出形態 (ピーク時間等) は様々となる。50km²程度の流域でも、流域に平均的に降雨がある場合に比べて下流に降雨が集中するケースで、合理式に比べて 3 割もの流量増となり、ピーク流量が約 20 分速くなる。

d) 河川・下水道の超過外力に対する流量

下水道の整備計画のレベルは、原則として 1/5~1/10 確率³⁾であり一般的に河川に比べて低い。このことから下水道が完備された都市流域では、往々にして集中豪雨等により下水道施設能力を超えて内水氾濫を起し、その分河川

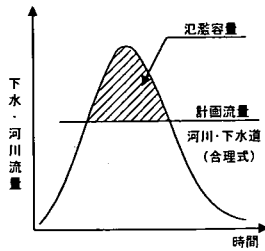


図-19 氾濫量の推定

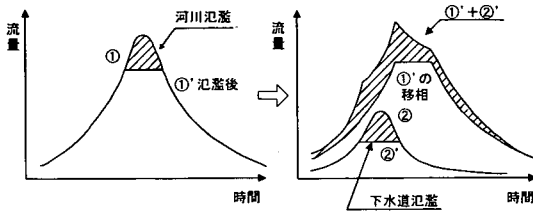


図-20 河川下水道の氾濫後の重ね合わせ

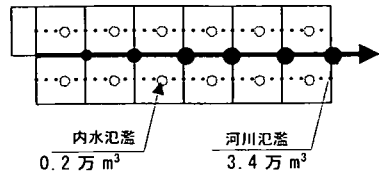
へ排水されず河川が下水道に比して余裕がある場合がある。一方で、下水道施設は合理式により短時間の強い降雨強度で設計されるので、台風のように比較的弱い降雨強度が長時間続く場合には、下水道は余裕を持って排水される代わりに、全体として河川に集中して氾濫する場合もある。

これらの氾濫について、その影響がどの程度河川流量に効くかを調べるために簡易的に内・外水の氾濫を見込めるモデルを検討した。

図-19に河川、下水道の能力を超える洪水での氾濫の考え方を示す。ここでは、河川、下水道の能力を合理式による計画流量とし、それを超える流量は内水、外水の氾濫量とした。河川・下水道の流量は、図-20に示すように河川・下水道の能力以上を氾濫量として除外した流量ハイドログラフを流下時間で移相させて重ね合わせることにした。

図-21に中央集中型降雨に対するこの氾濫を考慮した場合の計算結果を示す。このケースでは河道の氾濫容量は各所で3.4万 m^3 となり下水道の0.2万 m^3 に比べ大きい。この様な下水道での氾濫と河道での氾濫は複合的に発生し、各々の施設能力の組合せにより内外水の氾濫容量が変わってくる。図-22に中上流での河道・下水道の氾濫を考慮した場合としない場合の河川下流端での流量ハイドログラフを示す。ピーク流量は氾濫を考慮しない541 m^3/s に比べ504 m^3/s と約1割減となった。また、氾濫のある場合とない場合のボリュームの差は16万 m^3 となった。このようなピーク流量やピーク付近の流量ハイドログラフの差異は、例えばこの河川下流端に調節池等の計画を行う場合には大きな差となる。この点で、河川流量は上流での氾濫、下水道の排水量・流出形態及び内水氾濫形態も把握した上での見積もりが重要になる。

本解析では、上流での内水等による氾濫水の戻りは考慮



●河道氾濫量 ○下水道氾濫量：大きさは氾濫容量による

図-21 中央集中型降雨での計算結果

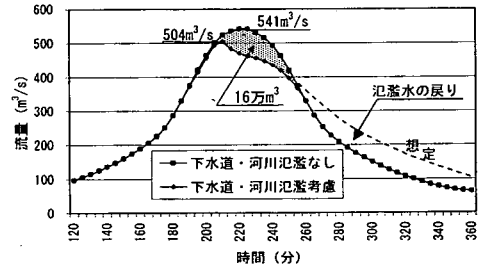


図-22 河川・下水道の氾濫の有無による河川流出量の差

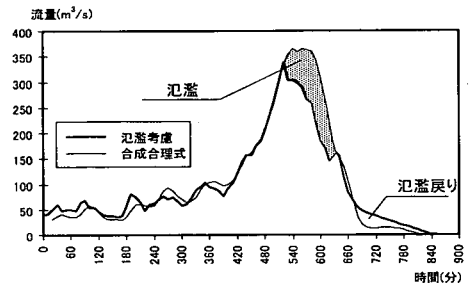


図-23 合成合理式と氾濫を考慮した解析結果の比較

していない。実際には、洪水低減期に河川水位が低下し、内水氾濫水が排水され河道に戻ることににより、図-22の点線に示すようなハイドログラフとなることが推定される。これらの氾濫水の戻りが、流量のピークや洪水調節池等の施設容量に影響する場合には考慮にいったモデルとすることが必要である。

図-23には、氾濫を考慮しない合成合理式と、対象流域を50mメッシュに区切った氾濫原を2次元不定流で、河道、下水道幹線を一次元不定流で解析し、内水、外水氾濫とその戻りも含めた詳細モデルとの解析結果²⁹⁾を比較した。合成合理式では、氾濫を生じないピークにいたるまでの流出波形では極めて良好に流出波形を再現していることがわかる。また、ピークでの氾濫によるハイドログラフの欠け方が図-22で示す形状ととても似ており、内水氾濫等による特性がよく再現できているものと思われる。このケースでは、氾濫水の戻りと考えられる差分は低減部の裾野の方であり、ピーク付近には影響していない。

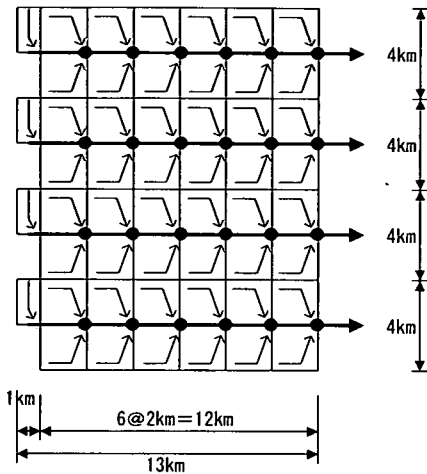


図-24 4流域モデルの組合せ

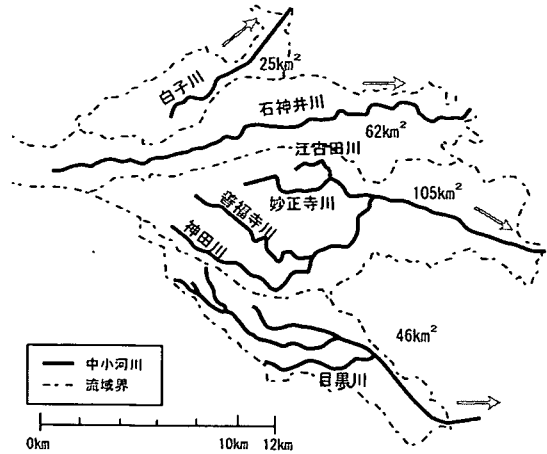


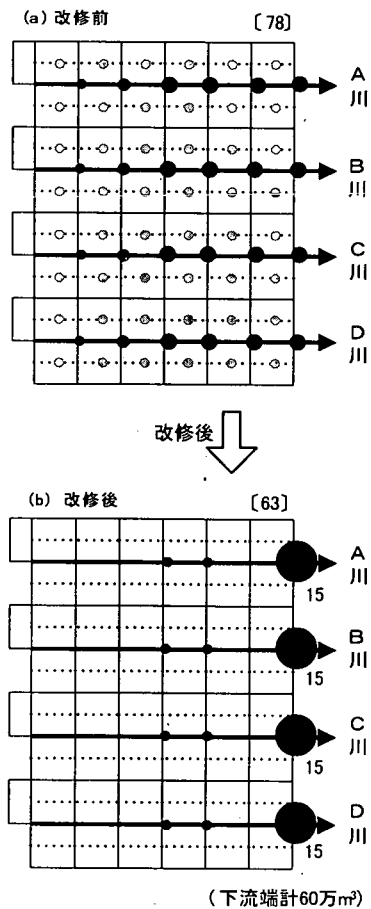
図-25 東京都区部中小河川流域規模²⁴⁾ との比較

4. 河川・下水道の連携した治水対策

地域分布をもつ実績の降雨に対する河川・下水道の治水対策についていくつかの検討例を示す。図-24 に示すような先の検討の 50km²の河川モデルを 4 流域並べたモデルを考える。東京都区部山の手の中小河川流域を図-25 に同じスケールで並べているがその流域規模から、神田川の中上流部、白子川、石神井川及び目黒川程度の 4 河川が並列している中小河川の組合せを単純化したものをイメージしている。対象降雨は、先述の中央集中型降雨及び降雨外力の時間・空間分布の影響を考慮するために、台風及び集中豪雨の実績降雨とした。計算は、下水道では河川への吐口、河道では下水道が合流する 2km ピッチの基準点についてのハイドログラフを先述の合成合理式のモデルを用いて求め、各計算点においての合理式計画流量を排水能力としてこれをを超える量を氾濫量として計上し、その下流へは流下しないととしてハイドログラフを重ね合わせることにした。

(1) 河川、下水道の改修の効果、影響

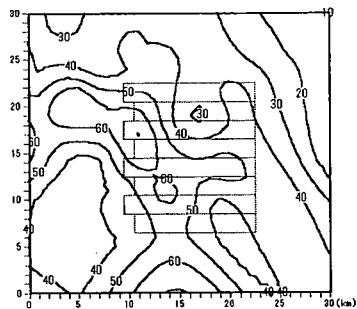
河川・下水道の能力の設定として、合理式による計画流量で整備したケース、及び合理式に比べて実態の流量が 1.2 倍程度になる前述の結果を踏まえて、下水道、河川を合理式での計画流量の 1.2 倍の能力で改修した場合について検討する。合理式による計画流量は、河川では各基準点の上流一括流域での、また下水道にあたっては、河川への吐口地点での上流一括 (4km²) での合理式による流量を計画流量 (= 流下能力) とし、氾濫量を算定するものとした。ただし、各 4 河川の下流端河道のみについては、合理式における計画流量の流下能力のままとし、上流下水道、河道の改修の影響に対する下流への負担の増分や、下流河



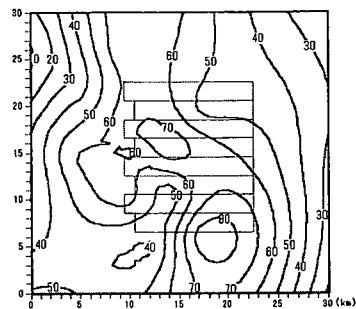
●河道氾濫量 ○下水道氾濫量 : 大きさは氾濫容量による
 ※図中数字は氾濫容量 (万 m³) , うち [] 書は、総氾濫容量

図-26 中央集中型降雨での計算結果

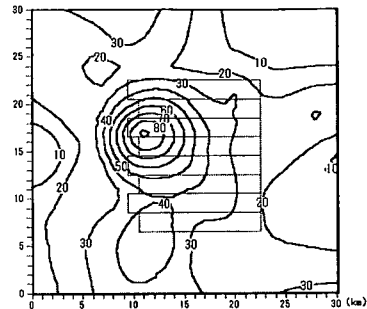
No.3 1989/08/01(台風 12号)



No.7 1981/07/22(集中豪雨)

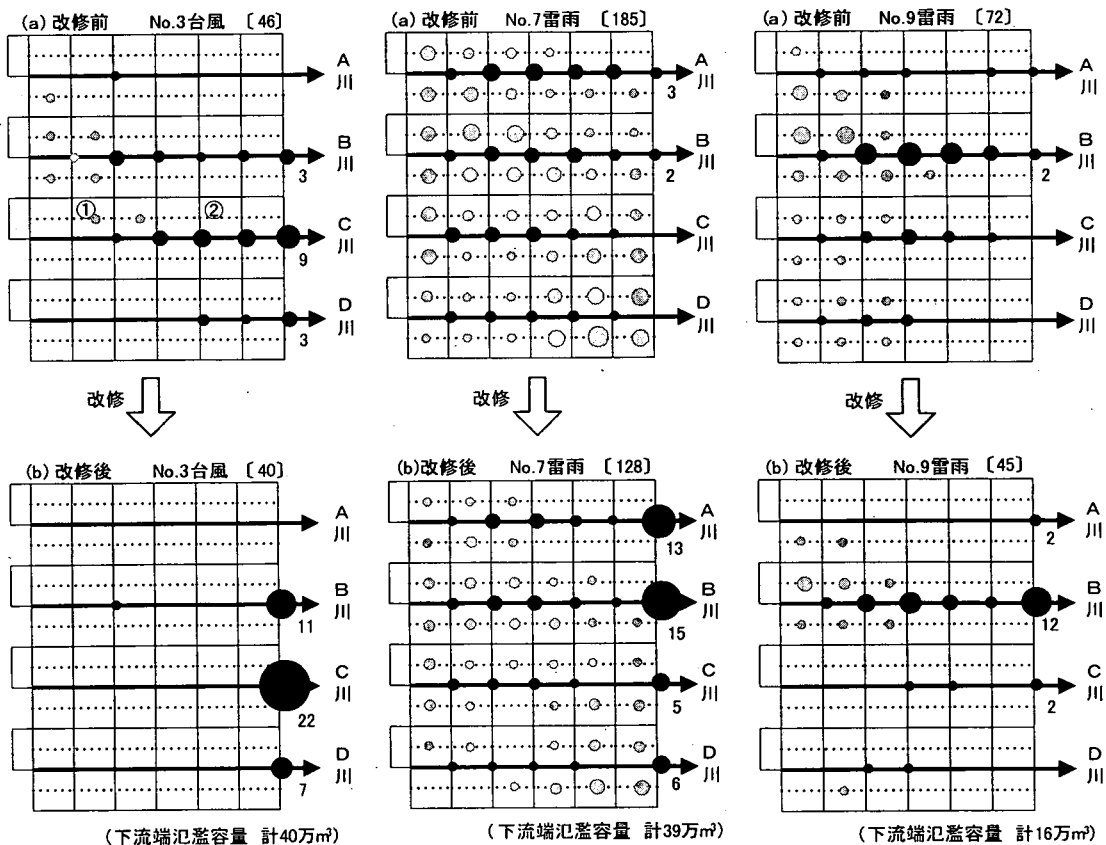


No.9 1987/07/24(集中豪雨)



※図中数字は60分最大降雨量(mm/hr), 細線はモデル流域位置

図-27 対象降雨の実績降雨分布(60分最大雨量)



No.3:1989/08/01 (台風 12号)

No.7:1981/07/22 (集中豪雨)

No.9:1987/07/24 (集中豪雨)

※ ●河道氾濫量 ○下水道氾濫量 図中数字は氾濫容量(万m³), うち〔〕書は、総氾濫容量

図-28 治水対策の効果、影響

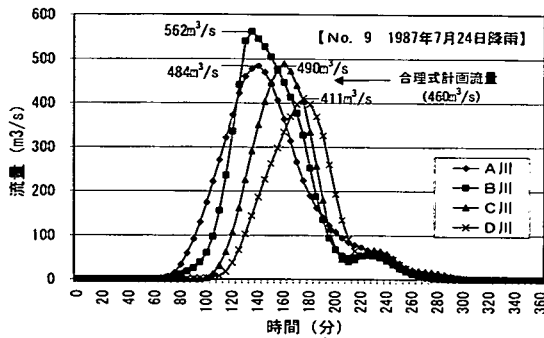


図-29 各河川の流出量の差

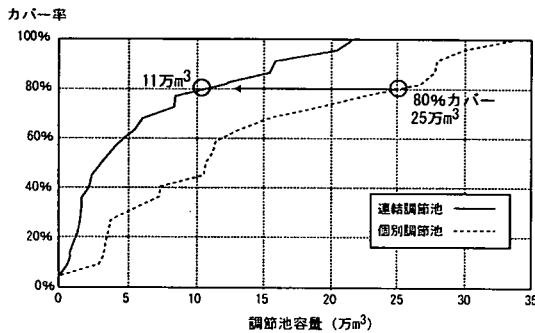


図-30 連結式調節池の効果²⁶⁾

道が改修困難であった場合の氾濫量, いいかえれば, 各河川・各洪水での必要な洪水調節池容量を表現することとしている。図-26(a)に中央集中型降雨での結果を示す。中央集中型降雨では, 下水道, 河道とも前項で検討したように, 河川・下水道の各所での流下能力を上回り, 河川, 下水道で氾濫している。図-26(b)に下水道・河川を改修した結果を示す。下水道・河川の氾濫は殆どなくなるが, 河川下流端での氾濫量が大きくなる。全体の河川・下水道の氾濫ボリュームは改修前78万 m^3 に比べて改修後は63万 m^3 と約2割程度小さくなるものの, この河道・下水道の改修は図-26(b)に示す様に下流河道の負担を増した結果となる。

実績降雨の検討は, 図-27に降雨の分布を示す東京都東部に発生した比較的規模の大きい3つの降雨を対象とした。対象域は, およそ3~5km間隔で10分毎の地上雨量記録が得られており, これを1kmメッシュに内挿することで各小流域(2 km^2)の流域平均雨量を算定した。図-28(a)に実績降雨による解析結果を示す。降雨の分布(図-27)と比べて分かるようにその集中域で下水道が氾濫し, その直下流側の河道が溢れる傾向にある。図-26(a)中の①に示す様に下水道で内水氾濫していながらその近傍河川では殆ど氾濫しないのに比べ, 図中②で示す下流河道で溢水しており, そこでは下水道は氾濫を起こしていない。

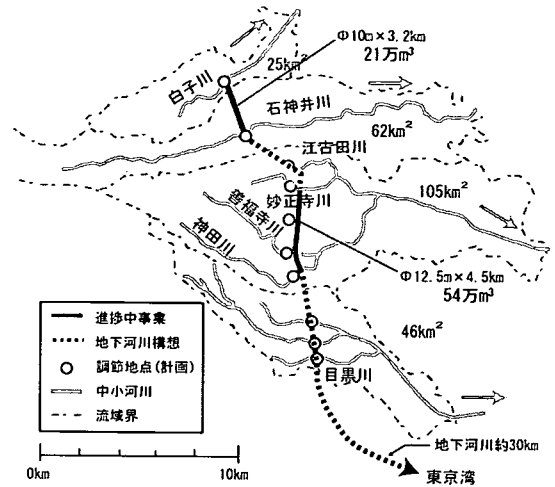


図-31 東京都地下河川構想²⁹⁾

下水道, 河川を改修した場合には, 実績降雨(図-28(b))でも中央集中型降雨の場合と同様で, No.3の降雨では流域内の氾濫がなくなり, 下流への負担, 氾濫が極めて大きくなる。No.7, No.9の降雨では流域内の被害が若干低減されるものの下流端での負担増が極めて大きくなる。総氾濫量は, 先と同様に改修後に若干の低減が見られる。総氾濫量は低減されても, 河川・下水道の改修が, 被害を下流へ移す結果となりうるので注意が必要である。この様に河道・下水道の改修は下流河道の能力との整合や内水, 外水の氾濫の改修による変化, 降雨地域分布などと合わせて考えていく必要があることを示唆している。

(2) 流域を連絡する調節池の効果

河道に調節池を設置する場合には, 計画規模の降雨に対して, 図-26(b)で示す様な下流端での氾濫を防ぐとして各河川にその氾濫容量分の調節池(各河川で15万 m^3 , 計60万 m^3)を設置することになる。図-26(b)で示すように実績降雨での下流端の氾濫量, つまり必要な調節池容量は, 降雨, 河川毎に大きく異なり, 1洪水では, 調節池を殆ど使わないで済む河川と(例えばNo.3のA川), 個別の調節池(例えば15万 m^3)でも氾濫が生じる河川(No.3でのC川)とが必ず混在することが分かる。図-29にNo.9の集中豪雨に対するA~Dまでの各河川下流端でのハイドログラフを示す。各河川での流量は大きく異なっており, 例えば合理式での計画流量460 m^3/s を超える量を必要な調節流量とすれば, この流量はB川の102 m^3/s (562 m^3/s -460 m^3/s)に比べD川では全く調節を必要としない結果になる。この点から, 河川毎に通常計画される15万 m^3 の4箇所個別の調節池を設置するよりも, これらを連絡する様な調節池とすることで, 降雨, 洪水の地域分布に柔

軟に対処出来る調節池となることは想像に難くない。

流域一律の中央集中型降雨外力を想定して、個別河川での調節池を計画するとすれば、図-26(b)に示すように15×4=60万m³が必要とされるが、図-28(b)に示すNo.3の降雨でC川では22万m³必要であり、この15万m³の個別調節池では容量が足らずに氾濫する。これに比べて対象とした3降雨全てに対しても、40万m³の連結した調節池があれば対応出来る。また洪水毎での調節池の空容量も合計として小さくなり効率的である。

河川・下水道流域での連絡調節池の効果の検討として、著者ら²⁶⁾は、実績の降雨群（実際に東京都区部に被害の見られた29降雨）に対して、図-30に示す様に80%のカバー率を得る場合には、個別に調節池を設置するよりも連絡式の調節池とすることでその約45%の調節池容量で対応出来る試算例を示している。また下水道管渠をループ型の貯留管とすることで、偏在性降雨に対して効果的であるという報告²⁷⁾や、下水道施設のネットワークの効果を検討した事例²⁸⁾もある。連絡式の調節施設の実現性という観点では、図-31に示す様に東京都区部で4水系10ヶ所からの洪水調節を図る地下河川の構想²⁹⁾もなされており、現在事業進捗中で部分的には供用開始されていることから、本検討でイメージする連絡式調節池は具体的に実現される可能性がある規模である事に加え、その様々な降雨分布に対応出来る効率的な運用が期待出来る。

市街化された都市域での地下河川、地下調節池等の治水施設については、合理式における流域一律降雨に対する検討での範囲を超えて、地域的な降雨の時空間偏差を有効活用し、流域を連絡する調節池による対策やこれらを含めた河川、下水道のネットワーク化が有効で、その効果や治水計画への反映、積極的活用が望まれる。

5. まとめ

本章では2~4章での都市中小河川や下水道の降雨、流出、氾濫特性の整理、合理式と合成合理式の差異及び治水対策の検討を踏まえ、台地部既成市街地における中小河川・下水道の連携した治水計画を行う方法と留意点(図-32)について著者らの考えを述べる。さらに今後の技術的課題についてまとめる。

(1) 降雨要因、降雨の時空間分布を考慮した外力の設定

流出・氾濫現象は、台風や雷雨等の降雨要因や短時間降雨の時空間分布により様々となる。

治水計画、治水対策の検討を行う降雨外力の設定は、河川・下水道で同一の、実態として起きうる様々な複数の降雨外力を群として対象とすることが重要である。

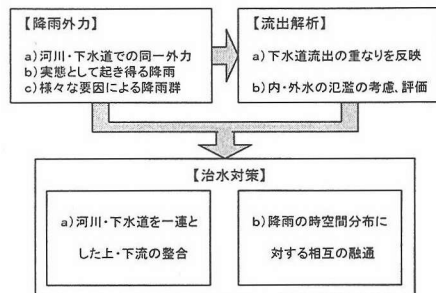


図-32 河川・下水道の連携した治水計画の立て方

a) 河川・下水道で同一の外力であること

河川と下水道においては、流出・氾濫現象が相互に影響し合うので、各々の到達時間による対象外力を対象とするのではなく、河川・下水道で同一外力が発生した場合にどちらにどの様な流出・氾濫被害が発生するか、また被害の総合的な評価が必要であり、同時に生じ得る河川・下水道での同一の外力の設定が必要である。

b) 実態として起きうる外力を対象とすること

降雨の地域分布、時間分布は一様ではないので、また降雨の時空間分布が流出に与える影響が大きいので、流域一律の中央集中型降雨の様な架空の降雨でなく、実際に起こり得る降雨要因による特性も加味した降雨の時空間分布を主に、設定することが重要である。

c) 様々な降雨要因による複数の降雨群を対象とすること

台風性や雷雨性などの時空間分布を異にする降雨外力に対して、総合的に被害を最小限にする必要があるので、単一の降雨外力でなく、実際に起きうる様々な降雨要因や地域分布をもった降雨群の設定と、その群全体としての被害を最小とする最適な治水対策を検討する必要がある。

(2) 河川・下水道を一体・一連とする流出解析手法

台地部の都市中小河川・下水道での流出は、短時間降雨と線形的関係にある。下水道の流出は、河川のピーク流量に大きく影響し、河川流量は多くの小さな下水道の流出量の重なり方に支配されている。このため、都市域の河川・下水道の治水計画を行う検討モデルは、これまでの合理式に代えて降雨の時空間分布や下水道流出量の重ね合わせを考慮出来ること、内・外水の氾濫量が流出に及ぼす影響も考慮出来るモデルであることが必要である。

a) 下水道の流出量の重ね合わせが解析出来ること

河川流量は下水道の流出の重なり方や降雨の時空間分布、地域分布に大きく影響するので、例えば、下水道の管理区分界である2km²以上となる下水道幹線や中小河川の流域は、合理式にかえて合成合理式等の、降雨外力の時空間分布や下水道の流出量の重ね合わせが細かに再現出来る流出解析モデルを用いることが必要である。

b) 内・外水の氾濫量。総合的な浸水被害が表現出来ること
河川、下水道での内・外水氾濫が流出量に影響し、また同一外力に対する総合的な被害を評価する必要があるため、下水道・河川での内・外水氾濫や流域、河川・下水道での貯留施設の効果が考慮・再現出来るモデルとする必要がある。

(3) 河川・下水道での整合・連携した治水対策

河川・下水道での連携した治水対策は、全体として最も効率的な治水対策の組合せ、様々な降雨に対する柔軟な連携・融通を考えていく必要がある。

a) 河川・下水道の改修の効果・相互影響の考慮

下水道、河道の改修は、河道下流への負担を大きくすることとなり、その改修規模、氾濫被害との関係、その対策の整合性に配慮することが重要となる。下水道・河川の改修や調節池の建設は、相対的に氾濫被害を上流から下流へ移相させたり、河道、調節池に余分な余裕を生む場合があるなど互いに影響し合うので、整合のとれた治水計画を相互に調整、連携して設定することが肝要である。

b) 降雨の地域分布・時間分布への融通

実績降雨分布に対する流出量は、河川毎、下水道毎に地域偏差が大きく、流域を連絡して降雨・洪水の地域分布・時間分布に柔軟に対処する連絡式調節池や、河川・下水のネットワークなどが、効果的・効率的な治水対策となる。この点で河川・下水道で一体となった全体の施設を有効活用する治水計画が重要である。一定の計画外力に基づく、河川・下水の分担量をきめるのではなく、様々な時空間分布を持つ洪水に対して、より効率的かつ柔軟に施設能力を融通しあえる治水対策の設定、工夫が重要であると考えられる。

(4) 今後の技術的課題

a) 狭域・短時間雨量の時空間分布特性の把握と計画への反映

現在の合理式に用いられている降雨強度曲線は、代表観測所一地点での降雨量の統計処理により求められており流域の広がりを持つなかでの地域偏差は考慮されていない。また、流域面積が広がる程流域平均降雨強度は弱まるため、その生起確率も地点でのものと違ってくる。さらに、地点での継続時間毎の年最大雨量を対象としているため、台風、雷雨等の要因、様相の異なる降雨を併せて継続時間と雨量強度の関係を作成しているため、到達時間によっては降雨発生要因の異なる降雨を合わせて用いていることが考えられる。都市域の中小河川・下水道においては、合理式で考慮されない降雨の時空間分布や降雨要因による特性の違いが流出・氾濫現象に大きく効いてくるので、まず外力としての降雨現象、特に短時間・狭域での降雨の時空間分布特性、DAD特性等の把握に資するデータの蓄積

と解析、計画への反映が重要な課題であると考えられる。また様々な降雨の時空間分布に、柔軟かつ効率的に、対応するための河川・下水道のネットワーク的な治水対策を考慮していくうえでも、その中小河川、下水道のスケールでの外力の時空間分布の特性を把握することは極めて重要である。

b) 下水道の流出実態の把握と治水計画への反映

河川の治水計画を行う場合には、下水道の整備状況、流出の実態・特性を十分に把握し、その河川での重なり方に対応する計画・対策及び段階的な整備計画の立案が必要である。一方で下水道の計画では、河川的能力、計画を十分に把握し、それに対応する適切な治水対策を行い河川への内水氾濫も含めた流出のインパクトを知らしめることが必要である。このように河川と下水道は、連続した一体の都市排水システムであり、効率的な整合のとれた治水施設整備・治水計画を図っていく必要があるため、特に下水道の流出・氾濫の実態、特性の把握と治水計画の反映が重要な課題である。

c) 下水道・中小河川での水文データの実態観測体制の強化

中小河川・下水道では、今までに細かな流出実態や、降雨の時空間的に密な分布などの観測が困難であったが、今後は、レーダ雨量計や最新の観測技術を駆使して、河川・下水道で連携した効率的な水位、流量、降雨、氾濫の実態観測の体制を整備、強化していくことが重要である。

これまでの下水道、河川で各々の計画規模に対する一定の洪水に対して、排水量を各々に、また「分担」し個別に進められてきた治水対策の考え方から、今後は整備途上の段階も含めて河川・下水道相互の影響への配慮、様々な降雨外力に対する柔軟な対応と融通、総合的な被害の評価と効率的な対策などの「連携」が重要な課題である。今後の河川・下水道の治水対策はこの「分担」から「連携」への転換が重要であると考えられる。

謝辞：本検討のモデル流域に対してのケーススタディを行うに当たり東京都建設局河川部計画課に実績雨量データや流域・計画等の資料の提供を頂きました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省河川局治水課・河川環境課監修：河川改修事業関係例規集、社団法人日本河川協会、例えば平成8年度版、pp.675-676、1996。
- 2) 中小河川計画検討会編集：中小河川計画の手引き（案）、（財）国土開発技術研究センター発行、pp.3-16、1999。
- 3) 建設省都市局下水道部監修、社団法人日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説—1994年度版—前編、pp.59-67、1994。

- 4) 財団法人下水道新技術推進機構：流出解析モデル利活用マニュアル（雨水対策における流出解析モデルの運用手引き），1999.3.
- 5) 飯岡靖明，古米弘明，市川新：下水道台帳データベースと細密数値情報を利用した分布型モデルによる都市雨水流出解析，下水道協会誌，Vol.38，No.469，pp.79-89，2001.
- 6) 建設省河川局監修，社団法人日本河川協会編：改訂建設省砂防技術基準（案）計画編，pp.19-20，同調査編，pp.149-150，山海堂，1985.
- 7) 山口高志，松原重昭，山守隆：都市流出解析—降雨損失機構の検討—，土木技術資料，Vol.13，No.10，pp.11-15，1971.
- 8) 山口高志，松原重昭，山守隆：都市における降雨流出調査第2報—修正RRL法による流出推定—，土木技術資料，Vol.14，No.11，pp.34-39，1972.
- 9) 山口高志，松原重昭，山守隆：都市における降雨流出調査第3報—修正RRL法の実用化に伴う諸問題—，土木技術資料，Vol.15，No.7，pp.37-42，p.46，1973.
- 10) 橋本建，長谷川正：土地利用変化を評価する流出モデル，土木技術資料，Vol.19，No.5，pp.11-16，1977.
- 11) 和泉清，吉川秀夫：下水道整備が洪水流出現象に及ぼす影響，土木学会論文集，第399号/II-10，pp.113-120，1988.
- 12) 福岡捷二，谷岡康，高本正彦：都市域中小河川流域における雨量観測所の密度が面積雨量精度に与える影響，水工学論文集，第37巻，pp.27-32，1993.
- 13) 谷岡康，福岡捷二，岩永勉，傳雲飛：都市中小河川流域規模を対象とした短時間雨量の変動特性と短時間降雨予測の試み，水工学論文集，第39巻，pp.56-60，1995.
- 14) 谷岡康，福岡捷二，傳雲飛：都市中小河川規模を対象とした地上雨量計による短時間雨量の変動予測，水工学論文集，第40巻，pp.273-278，1996.
- 15) 伊藤繁之，福岡捷二，谷岡康：都市中小河川流域における雷雨性降雨の時空間変動特性，第51回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，pp.768-769，1996.
- 16) 谷岡康，福岡捷二，岩永勉，北川明：都市域中小河川における洪水位と雨量の直接的関係を用いた洪水解析，水工学論文集，第38巻，pp.69-74，1994.
- 17) 谷口将俊，福岡捷二，谷岡康：都市中小河川の洪水実態とその解析，第51回土木学会年次学術講演会講演概要集，第2部，pp.688-689，1996.
- 18) 福岡捷二，川重光正，谷岡康：都市中小河川における降雨と流出，第47回平成7年度土木学会中国支部研究発表会概要集，1995.
- 19) 谷岡康：都市中小河川流域における降雨と洪水流出の特性に関する研究，広島大学学位論文，pp.22-26，1998.3
- 20) 谷岡康，福岡捷二，谷口将俊，小山幸也：都市中小河川の洪水流出特性，土木学会論文集，No.586/II-42，pp.1-12，1998.2
- 21) 吉野文雄：合理式による洪水流量の算定についての提案，第27回建設省技術研究会報告，pp.581-586，1975.
- 22) 谷岡康，福岡捷二，伊藤繁之，小山幸也，傳雲飛：都市中小河川流域規模を対象とした短時間雨量の特性，土木学会論文集，第579号/II-41，pp.29-45，1997.11
- 23) Viessman, W., Jr. and Lewis, G.L.: *Introduction to Hydrology, Fourth Edition*, Harper Collins College Publishers, p.318, 1996.
- 24) 東京都建設局河川部計画課：'85 東京の中小河川，pp.22-24，1985.
- 25) 都市型水害対策検討委員会：委員会検討資料，2002.6
- 26) 谷岡康，福岡捷二，高橋康夫：都市中小河川における連絡式調節池の効果，土木学会水工学論文集，第43巻，pp.163-168，1999.
- 27) 佐伯謹吾：効率的な雨水整備に関する一試案，下水道協会誌，Vol.36，No.440，pp.9-18，1999.6
- 28) 伊藤博：貯留とネットワークによる効率的な浸水対策，流域管理2001講演要旨集，ヨーロッパ水協会・米国水環境連盟・社団法人日本下水道協会，pp.12-14，2001.7
- 29) 東京都地下河川構想検討会事務局：地下河川（UNDER GROUND RIVER），東京都パンフレット，1991.8

(2002. 7. 30 受付)

FLOOD CONTROL PROJECTS THROUGH COORDINATION BETWEEN RIVERS AND SEWERS IN URBAN AREAS

—PROJECTS FOR PLATEAU BUILT-UP AREAS—

Yasushi TANIOKA and Shoji FUKUOKA

Flood control systems for urban areas in which outflows of rivers and sewers are correlated require crisis-management measures to be taken in advance to minimize the entire damage of excess floods. However, flood control projects through coordination between rivers and sewers must be given highest priority and must be considered immediately to cope with urban flood disasters, which occur almost every year. This paper deals with catchment areas of small sized rivers and sewers in plateau urban areas where sewages are naturally drained to rivers. It will present problems of the flood control measures being developed for each flood control project that is based on a rational method commonly used for sewers and small to medium sized rivers, by examining the actual conditions of rainfalls and characteristics of outflows and implementing concrete and practical case studies. It will then present a method for implementing flood control projects through coordination between rivers and sewers based on a composite rational method and clarify problems to be addressed in the future.