

都市と水害

吉野 文雄

はじめに

梅雨期から台風期に至るわが国の雨期には毎年、全国各地からの水害のニュースがテレビや新聞をにぎわしている。この傾向はわが国の高度経済成長とともに始まった都市域への人口資産の集中と都市域の拡大にその一因を求められる。治水投資が都市の発展と均衡していないことによるものと言ってよい。本稿は、都市における水害問題を現象論的に記述することは避けて、都市における水害問題を分析する方法論がどのような技術水準にあるかを紹介することを意図して書かれたものである。このような分析手法は都市域における水害対策の効果を判断したり、適切な政策の選択のために重要な役割を果たしている。

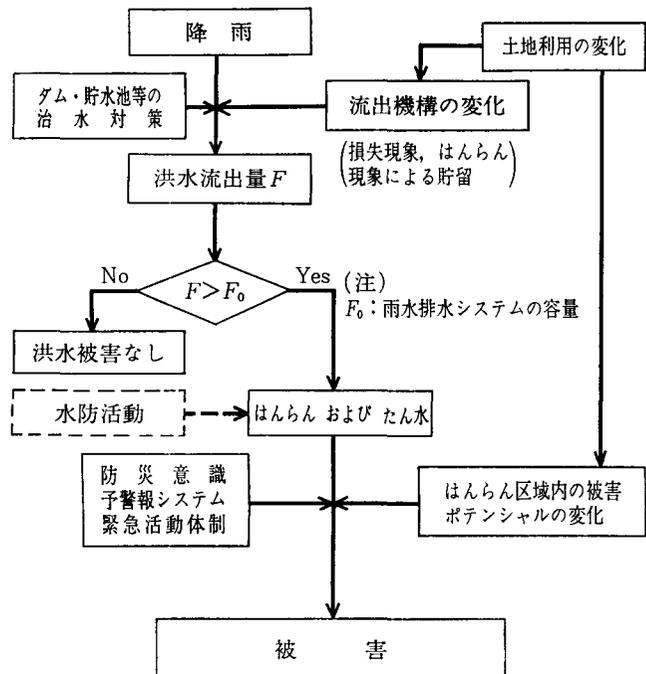


図1 洪水被害発生機構の模式化

1. 洪水被害の発生機構

洪水被害は、降雨流出量が河川等の雨水の貯留および排水能力を上まわる場合に生じる。

洪水被害が発生する機構は、一般に図1のように模式化される [1].

流域が都市化するにつれて、降雨の保水能力が低下し、かつ下水道等の雨水排水路が整備される

ことにより、降雨流出量が増大し、流出も早くなる。また、都市化とともに氾濫原において資産が増加するために、氾濫区域内の被害ポテンシャルも増大する。したがって、流域が都市化することで、洪水被害額は、降雨流出量の増大と被害ポテンシャルの増大という2つの原因により増大することになる。

代表的な都市化流域を対象として、流域の都市化が降雨流出および洪水被害におよぼす影響を推定した結果を以下に例示する。

よしの ふみお 建設省 土木研究所
〒305 茨城県筑波郡豊里町旭1番地

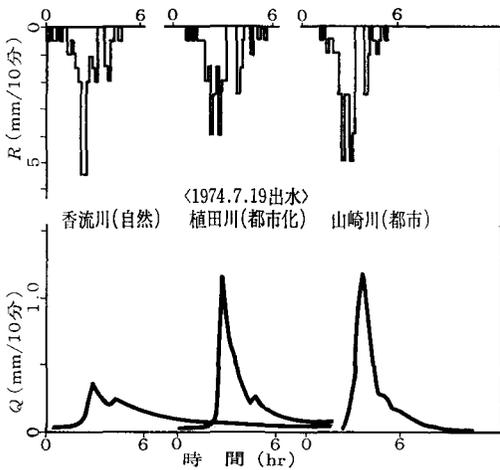


図2 庄内川流出試験地で観測した都市化が流出に与える影響

2. 都市化による流出の変化

図2は、流域面積がほぼ等しく、流域の都市化状況が異なる流出試験地での観測データをグラフ化し、都市化による流出の変化をみたものである。ほぼ同じ降雨に対して、都市化した流域からの流出が自然流域の流出に比較して大きいことがわかる。

一方、図3は、図4に示す流出解析モデルを用いて、A川（流域面積約35km²）における都市化による流出変化を推定したものであり、都市化によって流出量が大きく変化することがわかる。

流量を Q とし、それに影響を与える要因として、①河川の改修状況(X_1)、②流域斜面上の排水路の整備状況(X_2)、③土地利用変化に対応した不透面積の状況(X_3)とすると、流量 Q は次式で表現される。

$$Q = Q(X_1, X_2, X_3) \quad (1)$$

したがって、 $X_1 \sim X_3$ の変化に対応した流量 Q の変化は次式で与えられる。

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial X_1} \cdot \Delta X_1 + \frac{\partial Q}{\partial X_2} \cdot \Delta X_2 + \frac{\partial Q}{\partial X_3} \cdot \Delta X_3$$

$\left(\begin{array}{c} \text{河川改修} \\ \text{による流} \\ \text{量の変化} \end{array} \right)$

 $\left(\begin{array}{c} \text{流域斜面} \\ \text{上の排水} \\ \text{路の整備} \\ \text{による流} \\ \text{量の変化} \end{array} \right)$

 $\left(\begin{array}{c} \text{不透水面} \\ \text{積の変化} \\ \text{による流} \\ \text{量の変化} \end{array} \right)$

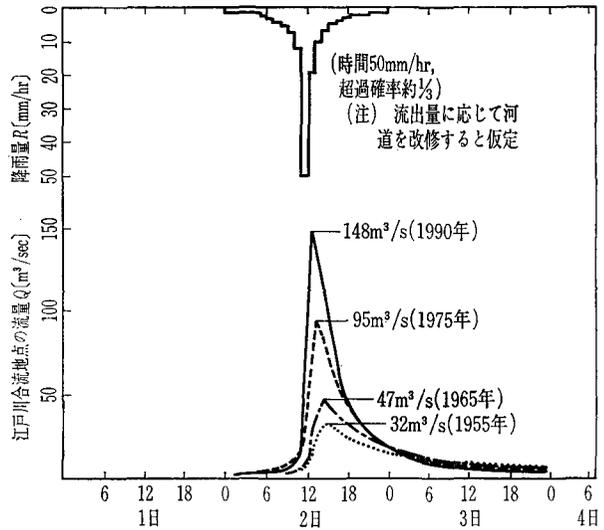


図3 都市化による流出の変化 (A川での推定)

$$+ \varepsilon \left(\frac{\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3}{\Delta X_1 \sim \Delta X_2 \text{ の複合} \text{ による流量の変化}} \right) \quad (2)$$

式(2)を用いて、図3に示される流出の変化を分析したものが図5であり、A川では不透面積の増大による保水能力の低下が流出変化の最も大きな原因となっていることが推定される [2].

図6は、昭和33年狩野川台風時と同じ降雨が昭和54年に再び降ったとしたときに、流量の変化と同様の方法により、氾濫水位がどのように変化するかを推定したものである。図からもわかるように、都市化による流出増の影響(水位上昇)はあるものの狩野川台風後に進められた河川改修の効果がそれ以上にきいて、氾濫水位が特に下流部で大幅に低下するものと推定される [2].

3. 都市化による洪水被害額の変化

氾濫被害額は、治水経済調査要綱(建設省河川局)に示される方法にもとづいて、図7に示されるモデルを用いることにより推定することができる [1]. 年平均洪水被害額 \bar{D} は一般的に次式により算定される。

$$D = D(F, S, F_0) \quad (3)$$

$$\bar{D} = \int_{F_0}^{\infty} D(F, S, F_0) \cdot P_r(F) \cdot dF \quad (4)$$

ここに、 D : 洪水被害額、 F : 外力(降雨量)、

モデル	摘要	概念図
水文モデル	<p>①確率降雨モデル 中央集中型確率降雨を用いる。</p> <p>②有効降雨モデル 浸透域・不浸透域別に損失モデルを設置し、有効降雨を求める。</p> <p>③流域斜面モデル 貯留関数法を用いる</p> $\frac{dSl}{dt} = R_e - Q$ $Sl = KQ^P$ <p>ここに、Sl: 貯留量, K・P: 定数</p>	<p>a) 降雨強度曲線 b) 中央集中型降雨</p> <p>R, R_c, D_p (初期損失) R, R_c, D_p (初期損失)</p> <p>a) 不浸透域 b) 浸透域</p> <p>流域斜面 河道 流出地点</p> <p>I_1, Rl_1, n_1 I_2, Rl_2, n_2 I_3, Rl_3, n_3</p>
	<p>①河道はんらんおよびモデル はんらん計算は不定流計算で行なう。ロッタ一の式により複合粗度を求める。</p> $n = \frac{IRl^{\frac{2}{3}}}{I_1 Rl_1^{\frac{2}{3}}/n_1 + \dots + I_n Rl_n^{\frac{2}{3}}/n_n}$ <p>ここに、I: 勾配, Rl: 径深, n: 粗度係数</p>	

図4 流出・氾濫モデル (A川でのモデル)

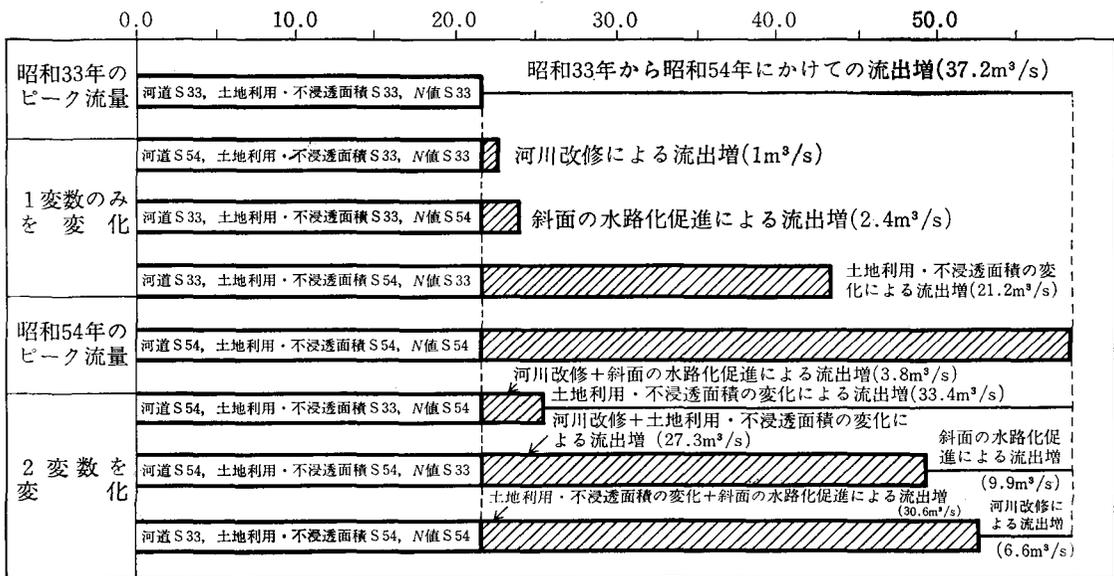


図5 流出量に変化する原因の分析 (A川での例)

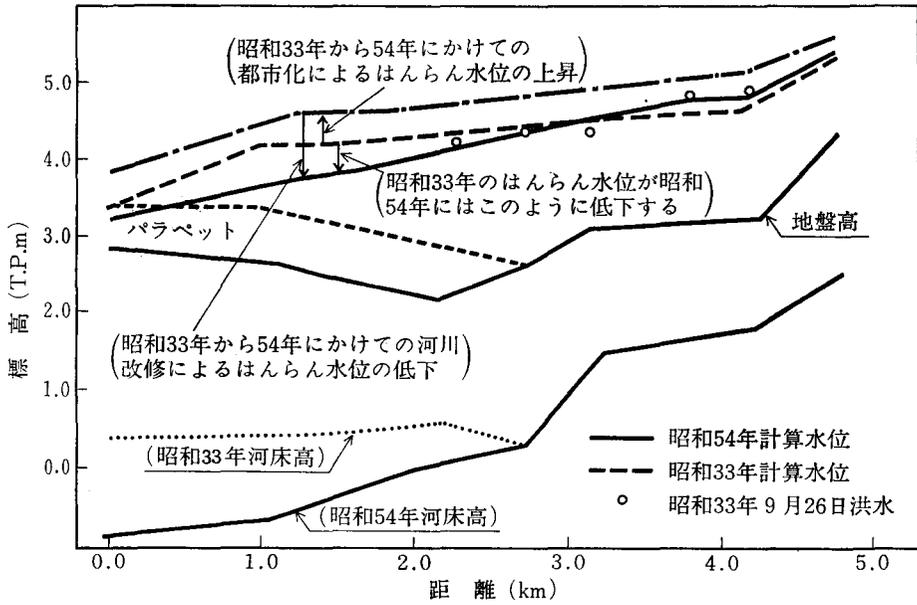


図 6 氾濫水深が変化する原因の分析 (A川の例)

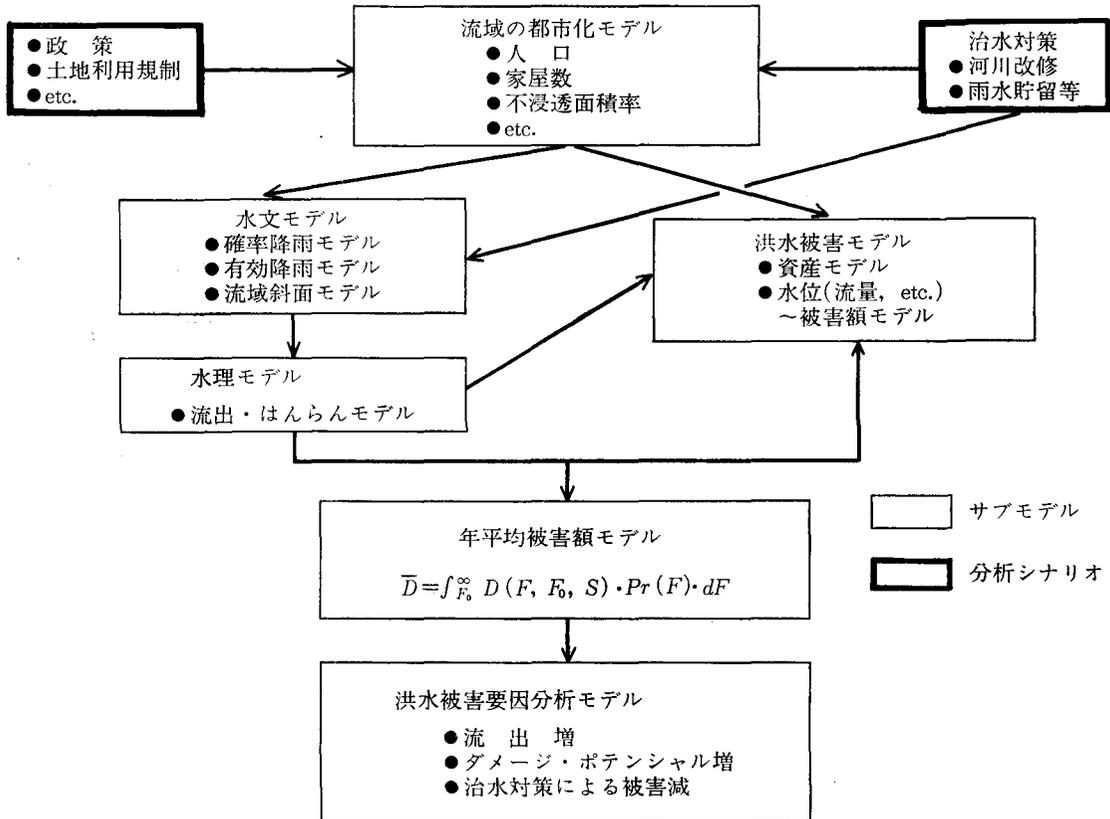


図 7 洪水被害額の分析モデル

S : 被害ポテンシャル, F_0 : 無被害最大流量 (治水施設の容量に対応), $P_r(F)$: 外力 F の確率密度関数, である.

都市化流域では, 地表面が不透透性のもので被覆されることによる不透透面積の増大, 道路側溝や下水道の整備による排水能力の増大により, 同規模の降雨 (外力 F) に対して流出量が增大する. この流出量の増大に対応して, 河川水位または氾濫水位 H が変化する. つまり, 降雨量 F は氾濫水位 H を通じて被害額に影響を与えるのであるから, 式(3), (4)を次のように書きあらためることにしよう.

$$D = D(H(F), S, F_0) \quad (5)$$

$$\bar{D} = \int_{F_0}^{\infty} D(H(F), S, F_0) \cdot P_r(F) \cdot dF \quad (6)$$

式(5), (6)より, 年平均洪水被害額 \bar{D} もまた H, S, F_0 の関数であることから, \bar{D} が変化する要因は次式によって表現されることがわかる.

$$\begin{aligned} \Delta \bar{D} \doteq & \frac{\partial \bar{D}}{\partial H} \cdot \Delta H + \frac{\partial \bar{D}}{\partial S} \cdot \Delta S + \frac{\partial \bar{D}}{\partial F_0} \cdot \Delta F_0 \\ & \left(\begin{array}{l} \text{氾濫水位の上昇による被害額の増大} \\ \text{被害ポテンシャルの増大による被害額の増大} \\ \text{治水策による被害額の軽減} \end{array} \right) \\ & + \varepsilon(\Delta H, \Delta S, \Delta F_0) \quad (7) \\ & \left(\begin{array}{l} \text{氾濫水位の上昇に} \\ \text{よる被害額の増大} \end{array} \right) \end{aligned}$$

ここに, $\Delta H, \Delta S, \Delta F_0$: H, S, F_0 の変化分,

$\Delta \bar{D}$: 年平均洪水被害額の変化分である. また, 一般に, $\partial \bar{D} / \partial H > 0, \partial \bar{D} / \partial S > 0, \partial \bar{D} / \partial F_0 < 0$ である.

式(5)~(7)にもとづいて, B川 (流域面積約12 km²) を対象として1961年から1985年までの年平均洪水被害額を推定するとともに, 被害額の変化する原因を分析したものが図8(a), (b)である. 図8(a)は治水対策がまったく行なわれないと仮定し

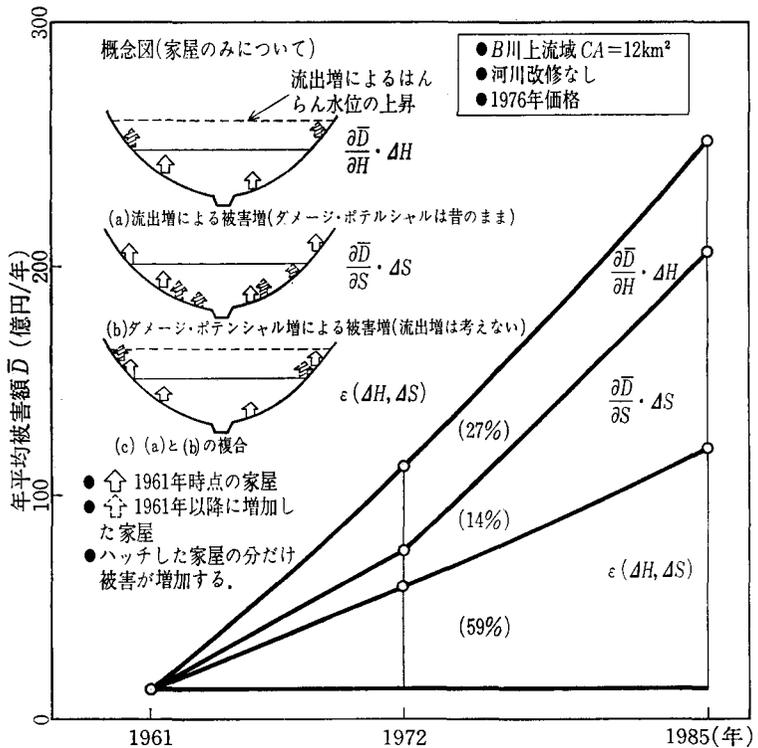


図 8 (a) 年平均洪水被害額の変化 (洪水対策なし)

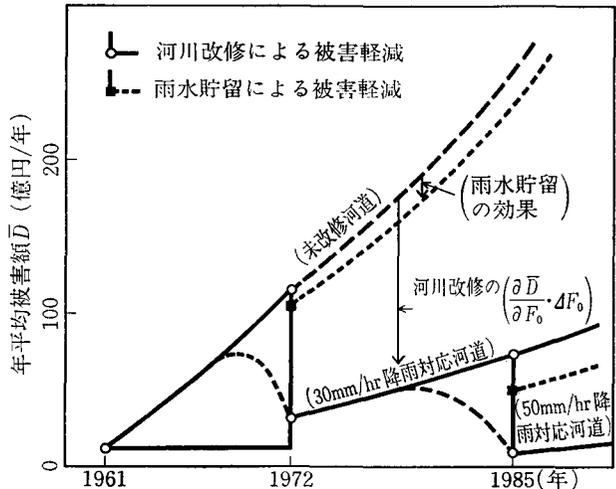


図 8 (b) 治水対策の効果を考慮した \bar{D} の経年変化

た場合のものであり, その場合には年平均洪水被害額 \bar{D} は, 1985年度には1961年度の約18倍となると推定される. 年平均洪水被害額が増大する原因は, 25年間の平均で見ると, 図中の概念図に示されているように, ①都市化による流出増によって浸水位が上昇することに起因した増分 $(\frac{\partial \bar{D}}{\partial H} \cdot \Delta H)$ 27%, ②もともと浸水する場所で被害ポテンシ

ルが増大することに起因した増分 $(\frac{\partial \bar{D}}{\partial S} \cdot \Delta S)$ 14%, ③都市化による流出増のため浸水水位が上昇して危険になった場所において被害ポテンシャルが増大することに起因した増分 $(e(\Delta H, \Delta S))$ 59%からなっていることがわかる。

一方、図8(b)は、同流域で立案されている河川改修が予定どおりに実現されたと仮定した場合に、年平均洪水被害額がどの程度軽減されるか $(\frac{\partial \bar{D}}{\partial F_0} \cdot \Delta F_0)$ を太い実線で示し、治水対策の効果をみたものである。

4. 都市河川の水害問題の分析的評価

①降雨流出・氾濫現象からみた場合

流域の都市化が流出・氾濫特性におよぼす影響については、図1～3にみたとおりである。では、それらをもとに、流出・氾濫現象からみた場合の治水上の上下流問題について検討する。

流域の都市化は、斜面上での降雨の保水能を低下させ(浸透面積の減少等)、有効降雨を増大させる。さらに、斜面上の排水路網の整備は、降雨の流達時間を短縮させ、流出波形を先鋭化させるために、同じ有効降雨に対するピーク流出量を増大させる。これらのために、上流域の開発は下流の流量を増大させる。A川の事例では、上流域での土地利用の変化に起因した水田・畑地面積の減少と不浸透面積の増大が、流出量の増大の主要な原因であることが示された(図5)。ただし、これはA川では下水道等の排水路網の整備が十分に行なわれていないためであり、流域によっては排水路網の整備によるピーク流量の増大が顕著である場合もみつけられる。

②洪水被害からみた場合

同様にして、洪水被害額からみた場合の上下流問題についても、前述の都市化による洪水被害額

表1 総合的な治水対策

洪水の変形	被害ポテンシャルの調整	被害の調整	無対応
洪水防御 堤防 河川改修 防水路 貯水池 高潮堤	土地利用の誘導・規則 土地利用規制 宅地開発指導 建築基準 公的な土地の買収 補助による再配置	洪水予警報 水防活動 緊急対応 避難 災害救助 復旧計画 公的援助 洪水保険 税金の免除	被害甘受
流域処理 流出抑制 (雨水貯留, 地下浸透) 遊水機能保全 再植林 侵食対策	建築物の耐水化 低位開口部の閉そく 高床建築物 盛土 耐水外装・家具 下水の逆流防止弁		
気象修正			

の増大の分析結果より知ることができる。式(7)の第1項は、流出量が増大することにより、以前は被害を受けなかった資産が被害を受けるようになることを示している。すなわち、上流の開発が原因となった上下流問題を示している。第2および第4項は、氾濫原に新たに資産が進出するために被害額が増大することを示しており、これらは被害を受ける側が原因となっている。B川の事例では、図8(a)に示されたように、年平均被害の増大の約27%程度が上流の開発に起因した被害額の増加分であることが知られる。

5. 都市河川の治水対策

流域の都市化が急激に進み、上述のような治水上の問題が生じている流域では、総合治水対策特定河川事業が発足した。この総合治水対策は、従来の治水方式に比較していくつかの点で斬新な内容を有している。表1は総合的な治水対策として考えられるメニューを分類したものである。

現在実施されつつある総合治水対策は、従来どおりの治水対策を実施していくと、都市化による洪水被害の増加が急激に進むために、治水の問題が深刻さを増すことから、河川改修を集中的に行なうとともに、流域の保水・遊水機能を保全しよ

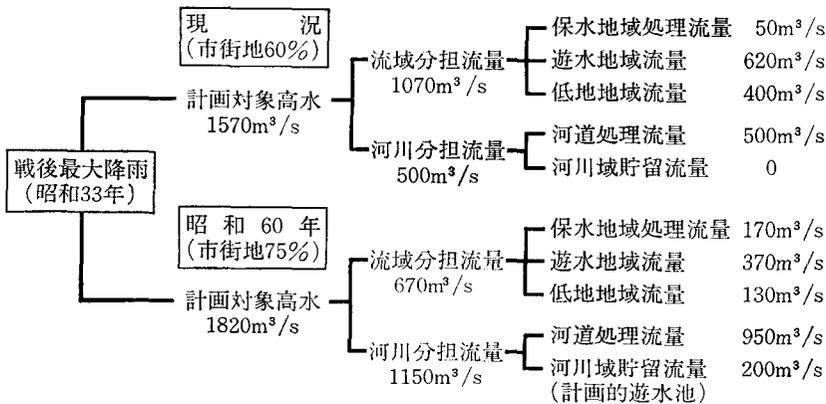


図 9 鶴見川流域の流量分担計画図

うとしたものである。したがって、河川という線の対策から、流域を含む面的な治水対策へと治水計画の考え方が拡張されたといえる。

鶴見川流域では、河川改修が従来のペースで進められたとき、流域の開発による流出増のために治水安全度が低下し洪水被害が深刻化することが上述のような手法にもとづき明らかにされた[3]。

このような状況に対して、鶴見川流域では、流域協議会により図9に示されるような総合治水計画が立案された。図9は流量分担図と呼ばれるものであり、河川改修により処理される流量、流域において雨水貯留施設等により処理される流量および遊水により処理される流量が示されている。

図よりわかるように、河川分担流量に加えて、流域分担流量が見込まれているのが特徴であり、従来の河川改修（遊水地を含むものとする）のみを主体とした流量配分図と比較すると、その違いが明確になる。流域分担流量は、集中的な河川改修によっても処理しきれない流量を流域内で処理することにより、流域の治水安全度を確保しようとしたものである。

6. 治水対策の費用便益分析

都市域での治水対策の効率性を費用便益分析により試算してみた。対象流域は上述のB川であり、河川改修と雨水貯留を対象とした。河川改修は図8(b)に示されたものとし、計画どおり改修が

行なわれるものと仮定した。

一方、雨水貯留施設は、雨水貯留施設を設置する場所を調査した後（雨水貯留ポテンシャル調査）、設置可能な地域に対して300m³/haの貯水容量を設定した。

費用便益比は治水経済調査要綱に準拠して、便益および費用はそれぞれ次のように定義した。

$$B = \int_{T_0}^T \{ \bar{D}(\text{治水対策を実施しない}) - \bar{D}(\text{治水対策を実施}) \} dt \quad \{8\}$$

$$C = C_0(\text{用地費} + \text{築堤費}) + \int_{T_0}^T M(\text{維持管理費}) dt \quad \{9\}$$

ここに、 B ：保全便益、 \bar{D} ：年平均洪水被害額、 C ：総費用、 C_0 ：capital cost、 M ：running cost、 T_0 ：分析対象期間の初年度、 T ：分析対象期間の最終年度である。なお、 \bar{D} 、 C_0 、 M はそれぞれ分析対象期間の初年度の現在価値に換算して与えられるものとする。

その結果から以下のようなことがわかる。

① 河川改修についてみると、費用便益比は10以上であり、きわめて有効な治水対策であることがわかる。分析対象期間の最終年 T を1995年から2005年までとし、対象期間を短くしたのは、治水安全度がきわめて低く（超過確率1/3以下）、新たな河川改修が行なわれることを想定したためである。耐用期間を長くすれば、費用便益比はさらに大きくなる。

② 雨水貯留施設についてみると、平均的な費

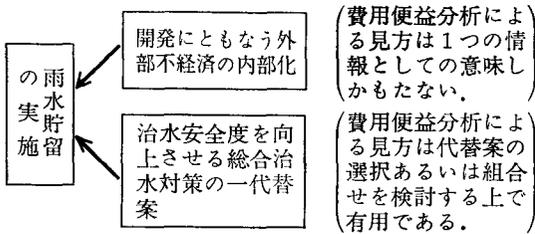


図 10 雨水貯留施設の費用便益分析の視点

用を設定したケースの場合には、 B/C は20~80と大きい。一方、相当高価な費用を設置したケースの場合には、 B/C は1~5程度である。

③ 河川改修と雨水貯留施設の効率性を比較する場合には、図10に示したような観点からみる必要がある。すなわち、治水対策の代替案として効率性を比較する場合には、 B/C の比較は意味をもつ。しかし、上流の開発の外部不経済を内部化させるために雨水貯留を義務づける場合には、 B/C の値は1.0より大きいかどうか問題とされるべきであろう。

あとがき

本稿では、都市河川の水害問題を評価する各種の手法の例を紹介した。これらの手法は都市河川

の水害を評価するためにいろいろなモデルを介在させている。したがってモデル化にあたっての種々の単純化が行なわれており、分析結果の解釈にも当然その限界がある。本稿は都市化の治水問題への影響を分析する方法論の試案と位置づけられるものである。なお紙数の都合から、治水対策上の重要な課題である公平性と効率性の分析について紹介できなかったが、後の機会に報告できればと考えている。この研究は筆者が土木研究所河川部総合治水研究室の室長当時、吉川研究員が中心となって進めてくれた研究成果を総括したものであり、吉川君の努力に深く敬意を表したい。

参考文献

- [1] 山口高志・吉川勝秀・角田 学：治水計画の策定および評価に関する研究，土木研究所報告，No. 156，1981
- [2] 吉川勝秀・吉野文雄・中島輝雄：流域の都市化による洪水災害の変化，第25回 水理講演会論文集，1981
- [3] 建設省土木研究所総合治水研究室：雨水貯留施設の最近の動向，1980

●ミニミニ● ●OR●

仕 分 け 箱

昔はやった冗談に、試験の答案を階段の上からバラマキ、落ちた段にしたがって点をつける怠け者の先生の話があった。バラマキのはともかく、階段を仕分け箱として使うというのは生活の知恵としては悪くない。とはいっても、自宅ならばとにかく、勤め先で階段に座りこむわけにもゆかない。乞食と間違えられてはさまにならない。

複写機で使う紙の空き箱の底を深さ15cmぐらいにカッターで切りとり、これを接着剤とガム・テープで纏めれば即席の仕分け箱が作れる。試みられよ。大きさの方も、もともと紙の箱だからぴったりだ。みてくれはあまりよくないが、使い捨てにして、そ

のつど作りなおしても、惜しくもないし、さほど手間もかからない。

(からくり堂主人)