

都市化流域における洪水災害の把握と 治水対策に関する研究

A STUDY ON THE ESTIMATION OF THE FLOOD DAMAGE AND
FLOOD CONTROL PLANNING IN AN URBANIZING WATERSHED

山口 高志*・吉川 勝秀**・角 田 学***
By Takayuki YAMAGUCHI, Katsuhide YOSHIKAWA
and Manabu TSUNODA

1. はじめに

多くの流域（主として上流域）で都市化が進行しており、それに伴って道路、上・下水道、公園等の公共サービスの立ち遅れが指摘されるようになった。そして、宅地開発計画や都市計画を立てる際に、それらに対する十分な配慮がなされるようになってきた。最近では、さらに、洪水災害に対する配慮の必要性が認識され始めている。

都市化が進行している流域の治水については、次のような問題が生じている¹⁾。第1に流域のはんらん原（洪水のはんらんが生じる可能性のある地域）へ資産が進出し、洪水被害が増大している。第2に都市化に伴う流域の保水・遊水機能の低下、および排水施設の整備に伴う流域の水路化の促進により、洪水流出が増大している。第3に都市域の中小河川の安全度が相対的に低く、しかも土地利用が進んでいるために、河川改修のみによる治水対策に限界がきている。

以上のような理由から、流域の都市化を容認したうえで治水対策を実施していくといった従来どおりの考え方のもとでは、増大する洪水災害に対応することが難しくなり、発想の転換が始められつつある^{2),4)}。これは総合治水対策とよばれ、構造的な治水対策としての河川改修に加えて雨水貯留といった流域処理手法を含み、被害を受ける対象物の耐水化、さらには治水からみた土地利用規制までもその概念に含んでいる。さらに、治水計画規模のはてしない向上を目指すのではなく、予警報や洪水保険といった非構造的な対策 (non-structural measu-

res) を結合した方法により、洪水被害の軽減あるいは救済についての検討もされつつある^{3),4)}。

本研究では、以上のような問題意識のもとでの一つのアプローチとして、都市化流域の治水問題を浮き彫りにするとともに、そのような流域における治水対策のあり方について検討する方法を提案し、ケース・スタディにおいてその適用を行った。そして本研究で用いた方法により、都市化が進行しつつある流域において、すでに生じている治水問題や将来生じる治水上の問題の解明が可能であることが明らかになった。現状における諸量の計測の実状を考慮すると、災害の分析や治水計画の策定において、多くの情報を得ることができる段階にきていると思われる。

2. 従来の研究と本研究の基本的立場

洪水災害の把握および治水対策の考え方に関する従来の研究について触れるとともに、本研究の基本的立場を明確にする。

(1) 従来の研究

流域の都市化と洪水災害の関係に着目した研究としては、Walesh・Videkovich の研究 (1978)⁵⁾、鶴見川流域水防災計画委員会の研究 (1977)⁶⁾ が興味深い。Waleshらは、メノモニー川を対象として、流域の土地利用状況（過去から将来にわたって7つの代替的な土地利用を設定）と洪水被害の関係および生起確率を同じにしたときの流量・はんらん水位の変化をシミュレーションし、将来の土地開発に治水の面からの提言を行っている。鶴見川流域水防災計画委員会は、流域の都市化に伴って洪水流出が増大して、従来どおりの治水投資では治水安全度が向上しないので、集中的な投資が必要であることを指摘している。水害に関する統計としては、日本全国の洪

* 正会員 工修 建設省関東地方建設局江戸川工事事務所所長（当時 建設省土木研究所総合治水研究室室長）

** 正会員 工修 建設省土木研究所総合治水研究室研究員

*** 正会員 工修 東京工業大学 助手 土木工学科（当時 早稲田大学大学院生）

水災害に関する調査が水害統計¹⁾として毎年集計されており、大河川（一級河川）については治水経済調査⁸⁾により想定被害額が調査されている。

一方、治水計画規模の設定方法については、① 安全度（洪水生起確率）でみる方法、② 被害の軽減でみる方法（費用効果分析を含む）、③ ①・② の中間的方法が用いられていることが多い¹⁾。方法①に関する研究は、水文統計解析として1930年前後より欧米で研究が始められ、日本でも1945年頃から石原・岩井らにより研究が着手された。最近では石原・則武（1978）⁹⁾がこの方法により、上・下流の計画規模について論じている。この方法は、水理・水文解析により比較的容易に、しかも精度高く計画規模が求められること、および計画規模を“何年に1回程度生じる規模の洪水”といったわかりやすい表現で示すことができるという利点がある。これらの理由により、現実の計画においては、主としてこの方法が用いられていることが多い。①の方法における計画の基本量は、時代とともにピーク流量・ハイドログラフ・ハイトグラフへと変わってきている¹⁰⁾。

方法②による研究としては、広長・八島・坂野の研究（1954）¹¹⁾、Walesh・Videkovichの研究（1978）⁵⁾が興味深い。広長らの研究は治水計画の妥当性を費用効果分析により検討した古典的なものであり、効果として地価の上昇（積極的效果）および洪水被害の軽減^{注1)}（消極的效果）を見込んでいる。Waleshらの研究では、洪水問題を方法①、②を並用し、時系列的に解析を行っている。方法②は、思想的には合理性の高いものではあるが、計画規模の設定に際して、被害軽減効果あるいはその他の効果の算定に膨大な解析が必要であり、しかも現状ではそのために必要なデータが精度よく入手できないことが多いといった理由により、方法①の補足的なものとして用いられている¹⁾。

方法①と同じ基礎に立ち、土地利用計画（はんらん原管理）と通常の治水対策に関連する治水問題を検討したものとしては、上述のWalesh・Videkovichの研究のようなシミュレーションによるもののほかに、最適化手法を用いたDay・Weiszの研究（1976）¹²⁾などがある。また、James（1965）¹³⁾は、経済効率と費用最小を基準として、複数の治水対策の適合性やプロジェクトのタイミングについて考察している。

方法③は、McCrorryら（1976）¹⁴⁾が、方法①による欠点を地形要因により修正するために提案したものである。同様に、吉野・吉川（1980）¹⁾は深刻さの程度による方法として、浸水図による表示も有効であることを

示している^{注2)}。

（2）本研究の基本的立場

流域の都市化に伴う洪水災害の変化は、被害の増大として端的に表現される。その増大のメカニズムは、① はんらん原での被害ポテンシャル^{注3)}の増大、② はんらん原および非はんらん原における保水・遊水機能の低下および流域の水路化の促進による流出増として説明される。都市化に伴う流出の変化（②の側面）について触れた研究は数多く行われている^{5), 6), 16)}。洪水被害額の増大については、Waleshら⁵⁾が分析しているが、上記①、②のメカニズムについての厳密な考察を行っているわけではない。したがって、①、②のメカニズムを分析的にとらえた研究が必要である。一方、時系列的な考察が重要となる都市化が進行中の流域における治水対策の評価については、James¹³⁾が治水プロジェクトのタイミングについて定性的に取り扱っているにすぎず、定量的かつ十分な考察を行ったものは、筆者らの知る限りではほとんどないと思われる。したがって、洪水災害増大の要因分析、および増大していく洪水被害に対処するための治水対策のあり方に着目した研究が必要と思われる。そこで本研究では、洪水災害増大の要因分析を行う手法を提案し、ケース・スタディを実施して、洪水被害増大のメカニズムを明らかにする。この分析において、都市化が進行している流域における治水をめぐる上・下流問題などについても言及する。さらに、河川改修および雨水貯留といった治水対策の妥当性、限られた財源のもとでの計画規模の拡張方法についての2、3の考察を行う。

本研究のケース・スタディは、上記の事柄に対する分析結果を与えるとともに、流域の土地利用計画策定の際に、治水問題を工学的な精度を保ったうえで定量化していく方法についての有益な情報を与えると考えられる。なお本研究において、土地利用の進展（都市化）を予測してア prioriに与え、したがってWaleshら⁵⁾、Dayら¹²⁾、James¹³⁾のように、治水水面からみた適正な土地利用を求めるという立場をとっていないのは、治水からみた土地利用規制という法制度が発達していないわが国の事情を考慮し、現時点での問題解決を指向したことによる。しかし、手法的には、代替的な土地利用形態をシナリオとして与えることにより、Waleshらの研究と同様の検討はもちろん可能である。

注 2) これらの代替的な評価方法については、文献 1) に統一的に述べられている。

注 3) 洪水ははんらんが生じたときに、被害を受ける資産のこと。この定義は文献 15) に与えられている。

注 1) 被害の軽減による便益は保全便益とよばれ（文献 3）、15）参照）、現在の治水経済調査では直接的な被害に対する保全便益のみが考慮されている¹⁾。

3. 洪水災害の把握・分析モデルと治水対策の評価モデルの提示

洪水災害の把握・分析手法、洪水災害増大の要因分析手法および治水対策の評価手法を提案する。以下に述べる方法は、シミュレーションにより洪水問題を精度高く把握するためのものであり、一般論として考察を進めるが、具体的に用いる個々のモデルおよび式については、次節のケース・スタディで例示する。

(1) 洪水被害の推定方法

洪水被害は、河川などの雨水排水システム（貯留システムを含むものとする）の容量を、流出量が上回った場合に生じる。したがって、その発生機構は図-1のように模式化される。すなわち、降雨は降雨損失（蒸発散・地下浸透・凹地貯留）・はんらんによる貯留等の流出フィルターおよびダム等の人工的な貯留フィルターを経た後に雨水排水システムに流入する（洪水流出 F ）。同図において土地利用の変化から流出機構に向かう線が示すように、都市化に伴う土地利用の変化が生じると、後述するように流出に大きな影響を及ぼす。雨水排水システムの容量 F_0 より洪水流出 F が小さい場合には、洪水被害は発生しない。 F が F_0 より大きい場合には、はんらんが生じる ($F > F_0$ である F のことを容量規模を上回ることから超過外力とよぶ^{17)~19)}。その際に生じる洪水被害は、たん水を被る地域の被害ポテンシャル、および水防活動・予警報・事前の防災意識等によって異なる。在来のパターンでの都市化流域では、はんらん区域内での被害ポテンシャルの増大が生じており、これが洪水被害増大の最も直接的な要因となっている。

以上のようにして発生する洪水災害のシミュレーションは、図-2 に示す手順およびモデルを用いる。同図の

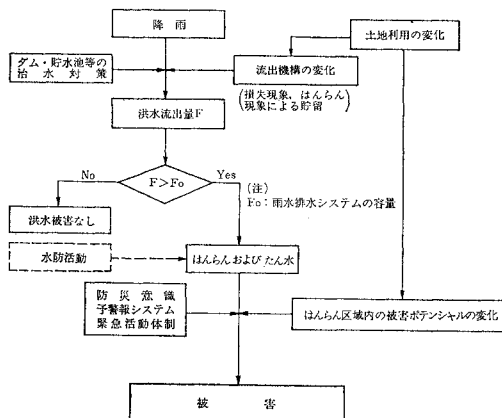


図-1 洪水災害発生機構の模式化

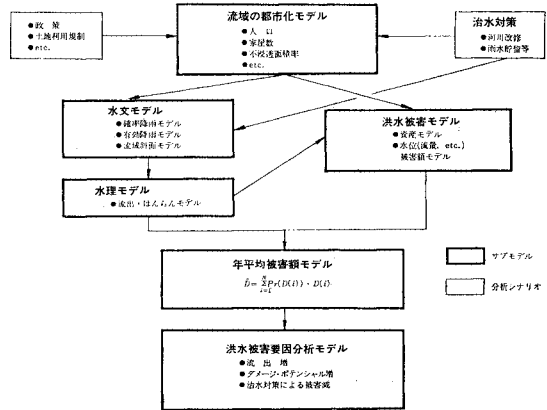


図-2 シミュレーション・モデルの構成

うち太線で囲んだものはサブモデルであり、他のものは分析あるいは政策シナリオとして与えられ、それぞれのサブモデルへの入力条件である。

a) 流域の都市化モデル

流域の都市化モデルでは、対象流域の人口、家屋数、工場・事業所数などの資産や、不透透面積などの流出計算における諸量を推定する。流域の変化を複雑な因果フローのもとで表現する計量経済モデルやSDモデル、単純なモデルとしての多変量モデル、時系列モデル（時間回帰モデル、ロジスティック曲線モデル）などの適用が可能である²⁰⁾。モデルの同定には過去のデータを用い、将来値は代替的なシナリオのもとでのシミュレーションにより推定する。

b) 水理・水文モデル

水理・水文モデルは、確率降雨・有効降雨モデル、流域斜面モデル、河道およびはんらんモデルより成り立っている。確率降雨・有効降雨モデルは、確率降雨発生モデルと降雨損失（機構）モデルより構成される。確率降雨を除くサブモデルとして用いられる各種手法の特徴および工学的な適用性については橋本らの研究（1977）¹⁶⁾があり、モデル作成の際の参考になる。都市化小流域において、各パラメーターの値が比較的よく調査されている流域斜面モデル・河道およびはんらんモデルとしては、それぞれ貯留関数法（修正 RRL 法も含む）および等流近似した不定流モデルなどがある¹⁶⁾。これらの一般的なパラメーターの値は、同定したモデルにおけるパラメーターのチェック、同定のためのデータがない場合および土地利用等の変化に起因したパラメーターの修正の際に活用される。流域の都市化に伴う流出変化は、浸透・保水能の低下、水路化の促進による到達時間の短縮、道路網の整備等による地表面粗度の低下などによって生じるので、この現象を単純化して明示的に表現するモデルを作ることが必要である。水理・水文モデル全体

の検証は、既往の複数の流出・はんらんデータを用いて行う。

c) 被害モデル

被害モデルでは、流域の被害ポテンシャルを推定し、はんらん状況ごとの被害を算定する。洪水被害の種類として、McCrorry ら (1978)¹⁴⁾ は、直接被害 (direct damage)・間接被害 (indirect damage)・二次的被害 (secondary damage)・評価できない被害 (intangible damage)・不確定被害 (uncertainty damage) に分類し、それらの程度がはんらん水深・流量・たん水時間等の約 10 のファクターに影響されるとしている。これらの被害項目のうち、直接被害は過去 10 数年にわたる治水経済調査や、水害統計資料より推定が可能になってきている注 4)。また間接被害および二次的被害については、産業連関分析手法を用いた研究が進められているが²¹⁾、前者に比較して精度的な検証が十分ではなく、今後の課題として残されている。間接および二次的被害の直接被害に対する比率のオーダーは、文献 5)、14)、21) に与えられている。直接被害は、はんらん水深と被害ポテンシャルを用いたモデルにより推定することができるが、対象流域において検証のためのデータを入手することは必ずしも容易でないことが多い。

また、災害後のあと始末の精神的・肉体的苦痛の評価について、筆者らの一人は、災害調査 (事後調査) を行った際に、現地調査をしているが²²⁾、このような直接・間接被害以外の被害の把握は必ずしも十分に行われているわけではない。

本研究では、治水経済調査要綱に従って計測可能な一般資産・農作物の浸水による貨幣的損失 (直接被害) のみを被害として算定することにする。

d) 年平均被害額算定モデル

洪水被害は、対象とする降雨 (あるいは確率降雨) に対して計算される。現実の問題としては、いつどの程度の洪水に見舞われるかがわかると都合であるが、その予測は現在のところ不可能に近い。しかし確率的に平均した値を求めることは可能であり、次のような計算を行う。

$$\bar{D} = E(D) = \int_{F_0}^{\infty} P_r(F) D(F) dF \dots\dots\dots (1)$$

$$D(F) = D(H, S) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 \bar{D} : 年平均被害額、 E : 期待値計算記号、 F : 洪水外力、 F_0 : 容量あるいは計画規模 (超過外力の最小値)、 $D(F)$: 外力 F のときの洪水被害、 H : はんらん水深、 S : 被害ポテンシャルである。ただし、式 (1)、(2) では、洪水被害を被害ポテンシャルとはんらん水位

により近似的に算定するものとしている^{8), 14)}。

式 (1)、(2) に基づく年平均被害額の計算手順は、図-5 においてその概要を示しているが、ケース・スタディにおいて具体的な事例を示す。

(2) 洪水被害増大の要因分析

式 (1)、(2) より、年平均被害額 \bar{D} は次のように一般化して考えることができる。

$$\bar{D} = \bar{D}(H, S, F_0) \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) の偏分をとることにより、洪水被害が次のようにして増大していくことがわかる注 5)。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{D} = & \frac{\partial \bar{D}}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial \bar{D}}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial \bar{D}}{\partial F_0} \Delta F_0 \\ & \underbrace{\left(\text{流出変化による項} \right)}_{\left(\text{被害ポテンシャルの変化による項} \right)} \underbrace{\left(\text{治水対策による項} \right)} \\ & + \varepsilon (\Delta H, \Delta S, \Delta F_0) \dots\dots\dots (4) \\ & \underbrace{\left(\text{それらの複合した項} \right)} \end{aligned}$$

一般に、 $\frac{\partial \bar{D}}{\partial H} > 0$ 、 $\frac{\partial \bar{D}}{\partial S} > 0$ 、 $\frac{\partial \bar{D}}{\partial F_0} < 0$ である。

流域の都市化が、治水対策を施すことなく進行した場合には、洪水災害は流出増に対応して増加する分、被害ポテンシャル増に対応して増加する分およびそれらの複合した分により説明される。治水対策が実施された場合には、式 (4) の右辺第 3 項に示される被害の軽減が加わる。通常の都市化しつつある流域で、それぞれの値がどのような割合となっているかは、後述のケース・スタディで明らかにされる。

(3) 費用便益分析に基づく治水対策の妥当性の一評価方法

治水対策の評価には、各種の視点に立脚したものがあ。たとえば 1954 年の寝屋川の改修において用いられた費用便益分析¹¹⁾ (便益としての地価の上昇 (積極的な効果) と被害の軽減による保全便益 (消極的な効果) を考えている) や、現在日本やアメリカで用いられている洪水はんらんの生起頻度を下げるように治水安全度を向上させることを第一義的な評価尺度とし、副次的に保全便益に基づいた費用便益分析を行うといったものがある。また実務的には必ずしも反映はされていないが、さらに視点を広げると、地域社会への経済的インパクト、外部不経済といった社会的費用、環境アセスメント等々の面からの評価もあり得る¹⁾。

しかし、ここでは現状での計測可能性を前提とし、現実の計画に用いることができ、かつ有益な情報を与える費用便益分析に基づいた評価方法を提示することにす

注 4) 治水経済調査要綱の被害原単位は、水害実態調査に基づいて定められている。

注 5) 式 (4) の計算は、時系列の差分計算により容易に求められる。詳細な計算に興味をお持ちの方は、文献 23) を参照されたい。

る。

治水対策の効果としては、洪水被害の軽減、地価の上昇、土地利用による機会費用、税収入増といった貨幣的な効果と、人命の救済や対策実施による安心感といった非貨幣的な効果がある^{1), 5), 12)~15), 21)}。それらすべてを便益とすればよいわけであるが、本研究では貨幣的な効果のうちで、現状において計測が可能となっているものを対象にする。これは、非貨幣的な効果の計測方法が確立されていないし、仮に計測されたとしても、貨幣的な効果との相対的な重要さを決めることは必ずしも容易ではないからである。またそれを取り込まなくても本研究の主旨は損なわれるわけではなく、有益な分析が可能なのも一つの理由である。

貨幣的な効果に限ってみると、種々のそれらの効果は重複計上（二重計上）を避け、便益を正とし、不便益を負として加算的に求められる。そして、その場合に代表的なものを1つ取り上げて、安全側の評価を行うことにすれば、以下の考察の一般性は損なわれない。そこで、以下では現状において計測がほぼ可能となってきた直接被害の軽減（保全便益）を取り上げることとする。

図-3 に、治水対策と被害軽減の関係を模式化して示す。同図における年平均洪水被害 \bar{D} は、現在価値 (t_1 年現在) に変換したものとす^{24)~28)}。 \bar{D}_0 は治水対策を実施することなく都市化が進行したとした場合の年平均被害額であり、 \bar{D}_a および \bar{D}_b はそれぞれ治水対策Aおよび治水対策AとBを実施した場合のものである。対策Aは t_1 年に実施され、対策Bは t_2 年に実施されるものとする。

治水対策Aによる被害軽減効果 $\bar{D}(A)$ は、そのライフサイクルを T 年までとすると、次式で与えられる。

$$\bar{D}(A) = \int_{t_1}^T (\bar{D}_0 - \bar{D}_a) dt \dots\dots\dots (5)$$

対策Aの後にさらに対策Bを追加的に実施した場合の効果 $\bar{D}(A+B)$ は、 T' 年 ($T' > t_2$) までをライフサイクルとすると次式で与えられる。

$$\bar{D}(A+B) = \int_{t_1}^{t_2} (\bar{D}_0 - \bar{D}_a) dt + \int_{t_2}^{T'} (\bar{D}_0 - \bar{D}_b) dt \dots\dots\dots (6)$$

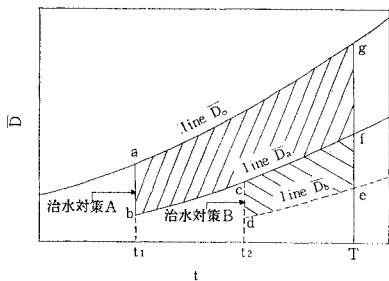


図-3 治水対策と被害軽減との関係

洪水被害の増大に対応して治水施設を段階的に拡張していく場合には、その方法として ① 独立した施設の追加 (series of independent project), ② 相互に関係した施設の追加 (series of interrelated project), ③ 施設の拡張 (incremental expansion of individual project), ④ 前施設を廃棄した拡充 (planned obsolescence) があるが²⁴⁾、ここでは一般的に式 (6) で与えておく。

次に対策を実施するうえで必要となる費用 C は、用地費・施設建設費・補償費（立ち退き補償、その他の社会的費用も含むものとする）などの、初期に集中的に必要な費用 C と、継続的に必要な維持管理費 M の和として与えられる。ここでも、費用は現在価値 (t_1 年現在) に変換して与えるものとする^{5), 28)}。

$$C(A) = C_A + M_A \dots\dots\dots (7)$$

$$C(A+B) = C_A + C_B + M_A' + M_B \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $C(A)$: 施設Aの総費用、 $C(A+B)$: 施設AおよびBの総費用、 $C_A \cdot C_B$: それぞれ施設A・Bの建設関連費用、 $M_A \cdot M_B$: それぞれ施設A・Bの維持管理費である。ただし、式 (8) の M_A' は、施設Bにより施設Aの維持管理費 M_A が変化する可能性があることを示す。建設関連費用 C については、一般に規模の経済 (scale merit) が、また段階的拡張では手戻り費用 (set-up cost) が考えられる²⁷⁾。さらに、治水対策の実施年度を遅くすると、地価の上昇や環境問題などによりコストが増大する¹³⁾。被害軽減および費用のある時点における現在価値を求める際には、社会的割引率を用いる^{24)~28)}。

一般に、需要（治水対策への需要）が時系列的に増大していく際の供給施設（治水対策）の経済的妥当性の検討においては、次のような事柄が取り扱われる。すなわち、① 施設規模の決定（一括拡張の場合と段階的拡張の場合の規模^{11), 24)~28)}、② 対策を実施する時期の決定（施設建設の時期^{25), 26)}、③ 規模および実施する時期の同時決定²⁹⁾といった問題である。その際に、プロジェクトの経済的妥当性は、それにかかる総便益が総費用（概念としては社会的費用も含む）を上回るものが第一条件となり、その際には通常は現在価値として考察が進められる^{27), 30)}。この基準を治水対策に適用すると、次のようになる。対策による便益とその費用を用いて、一つの評価方法としてその効率性 e および便益差 e' を次のようにして知ることができる。

$$e(A) = \frac{\bar{D}(A)}{C(A)}, e(A+B) = \frac{\bar{D}(A+B)}{C(A+B)} \dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} e'(A) &= \bar{D}(A) - C(A) \\ e'(A+B) &= \bar{D}(A+B) - C(A+B) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

したがって、第1段階として式 (9) あるいは (10) により、治水対策（段階的および一括拡張）の妥当性を知ることができる。すなわち、 $e(A)$, $e(A+B)$ が1より大

きいか、あるいは $e'(A)$, $e'(A+B)$ が正の場合には上述の基準が満たされていることになる。第2段階として、それら2つの対策実施方法の比較を行う場合には、規模に関するスケール・メリットや対策を実施する時期に関する社会的割引率、あるいは段階的拡張の場合の先行する対策が計画を取り巻く環境に与えるインパクトといったダイナミズムなどの影響を受けるので、対策実施の時期などについての詳細な分析が必要となる。

一括建設方式と追いかけ建設方式についての一般的な考察は、長尾・森杉・吉田(1976)²⁷⁾によって行われており、その適用領域が明らかにされているが、具体的な治水問題についてこれらの建設方式を比較する場合には、若干の異なる考察が必要となる。

後述のケース・スタディにおいて、以上の算定およびさらに拡張して段階的施設規模の拡張と一括拡張との比較を行う。

以上で示した評価方法は、古くは広長ら¹¹⁾や西畑¹⁵⁾により用いられ、治水経済調査において示されているものを、時系列的に拡張して用いるものである。前述のように、現実の計画ではこのような評価方法を副次的に採用している。本研究では、このような方法により、都市域での治水対策を評価すると、どの程度の妥当性を有するかを具体的に示すことに重点を置いている。

4. ケース・スタディ

3. で提案した一連の方法にそれぞれ具体的なモデルを設定し、都市化が進行している都内S川流域を対象にしてケース・スタディを実施した。すなわち、対象地域の治水問題を時系列的に把握し、年平均被害額の増加状況およびその変化のメカニズムを明らかにした。また、都市化が進行している流域の治水計画を、特に河川改修および雨水貯留計画に焦点をあてて、その効率性、計画規模拡張方式(段階的拡張方式、一括拡張方式)について検討を行った。

(1) 対象流域の概要

対象流域は、S川のN橋地点(以後N地点とよぶことにする)より上流の1区3市にまたがる地域で、河川延長8km、流域面積16.48km²であり、急激に都市化が進行している地域である(図-4(a))^{注6)}。本調査によると、都市化の指標の一つである不浸透面積率が、1961年から15年間において6%から27%に増大している。したがって、典型的な都市化進行地域であり、洪水災害の急激な増大がみられている地域であるために、本

注6) 流域面積16.48km²のうち上流の約4.5km²はS川の排水区域外(バイパス区域)となっている。

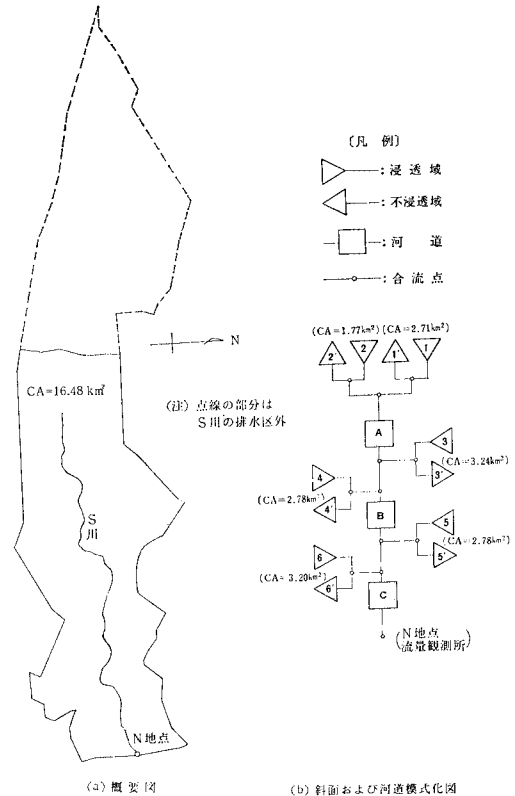


図-4 対象流域(S川)

研究の主旨に適した対象地域である。対象流域は、流域特性を考慮して図-4のように6流域ブロックに分割した。有効降雨モデルでは各流域ブロックを浸透域・不浸透域に分けて計算を行うものとした(図-4(b))。

(2) モデルの構成と同定

ケース・スタディでは、3. で述べた流出・はんらん・洪水災害のシミュレーション・モデルとして、図-5に示すものを採用した。同図にその概要を示すように、水文モデルとしては中央集中型確率降雨モデル³¹⁾(注7)、および浸透域・不浸透域別の有効降雨モデルを用いた。有効降雨モデルにおいては、不浸透域では凹地貯留能 D_I のみを、浸透域では凹地貯留能 D_P および浸透能 f_c を未知のパラメーターとして同定した。飽和浸透能 R_{sa} については、それが流出および被害に与える影響を感度分析した後、対象地域のような地質・地形に対して通常用いられる150mmを設定した。流域(斜面)モデルには貯留関数法を用い、定数 P は物理的に定め、 K

注7) 確率降雨としては、実績降雨データが豊富な場合には、建設省河川局・河川砂防技術基準(案)(1977)に示される実績引き伸し方式によるものも考えられるが、ここでは観測降雨データが少なかったために、東京都降雨強度曲線を用いた中央集中型降雨とした。

モデル	摘要	概念図
水文モデル	① 確率降雨モデル 中央集中型確率降雨を用いる。	
	② 有効降雨モデル 浸透域・不浸透域別に損失モデルを設定し有効降雨を求める。 ③ 流域斜面モデル 貯留開放法を用いる。 $\frac{dS1}{dt} = Re - Q$ $S1 = KQ^p$ ここに、S1:貯留量、Kp:定数	
水理モデル	① 河道およびはんらんモデル はんらん計算は不定流計算で行う。ロッターの式により粗度指数を求める。 $n = \frac{I \cdot R^{1/2}}{I_0 R_0^{1/2} + I_1 R_1^{1/2} + \dots + I_n R_n^{1/2} / n}$ ここに、I:勾配、R:流速、n:粗度係数	
水位-被害額モデル	① 標高別資産額モデル ② たん水位-被害額モデル $D = D \{ (H - H_0), S \}$ D: 水位Hまでの資産 H_0: 無被害最大水深 S: 被害ポテンシャル	
	年平均被害額モデル	$\bar{D} = \int_{F_0}^m P_r(F) \cdot D(F) dF$ $D(F) = D(H, S)$ ここに、F_0: 無被害最大外力

図-5 モデルの概要

を未知数として同定した。K は将来排水路の整備などにより変化するので、その値は他の類似流域の値から推定して変化させるようにした²²⁾。一方、水理モデルである河道およびはんらんモデルは、同流域が掘込み河道であることから、河道およびはんらん部分についてロッターの式²³⁾を適用し、一次元モデルとして粗度を推定して、河道およびはんらん原での抵抗項について等流近似した不定流モデルとした。

水位-被害モデルは、同流域の資産を河道ブロックごとに1~2mごとのコンター別に求め、治水経済調査要綱に示される各年度の原単価を用いて、水位-被害額曲線を作成した(図-6)。ただし、その際の被害額はすべて1972年の価格に変換した。年平均被害額は、各確率降雨ごとに発生する被害額とその生起確率を用いて、確率平均値(期待値)として式(1)により算定した。

以上の各サブモデルはいくつかの感度分析を行った後に同定したが、シミュレーション値と実測値の対応について、水理・水文モデルを例として2, 3の検証結果を示す。図-7(a)~(c)に、それぞれハイドログラフ・縦断水位、およびはんらん区域に関する検証例を示す。同図より、計算値は実測値と比較的によく対応していると判

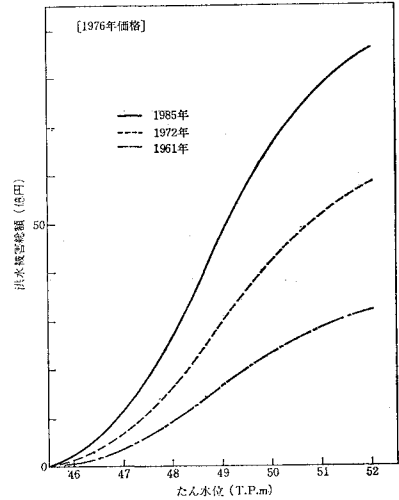


図-6 たん水位-被害額曲線(N地点近傍の約0.57km²について)

断されよう。

流域の都市化モデルでは人口・棟数・不浸透面積率等を算定した。都市化モデルとしては、3.(1)に示したような種々のものが用いられている。本研究では、そのうちの一つである時系列モデルを採用した。被害ポテンシャルと直接関係する棟数については、類似の家屋タイプである限り立地できる棟数に物理的な制限があるので、飽和状態値(上限値)を設定するロジスティック曲線モデルおよび時間回帰モデルを作成し、精度の面から前者を採用した。モデルの同定には1961年から1976年までのデータを用いた。人口・不浸透面積率については、前者を時間回帰モデル、後者を人口と棟数への回帰モデルとして将来の推定を行った。その結果については図-9(a)に例示した^{注8)}。

(3) 増大する洪水被害のシミュレーション

a) 都市化による流出の変化

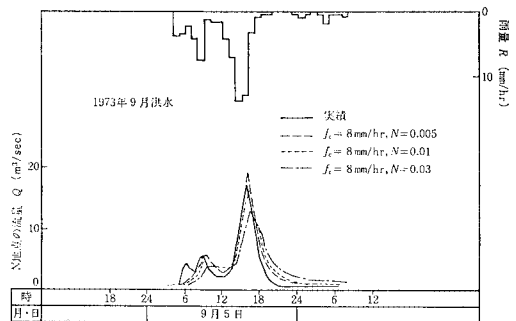


図-7(a) 流域斜面の等価粗度係数Nの同定

注8) 個々のサブモデルの詳細については、文献23)に詳しく述べている。

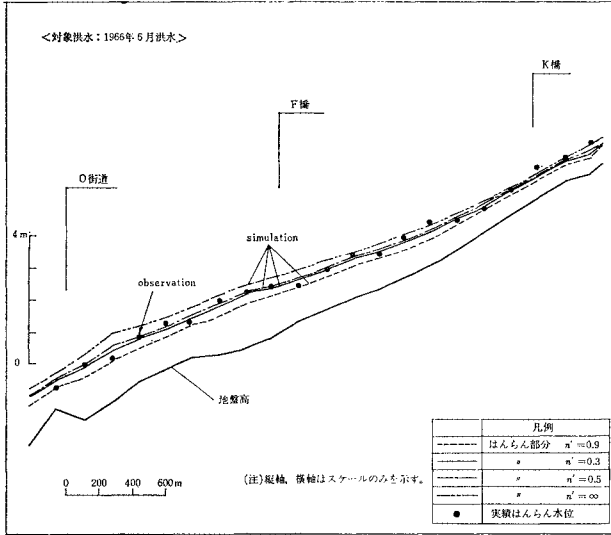


図-7(b) はんらん部分の粗度係数 n' の同定

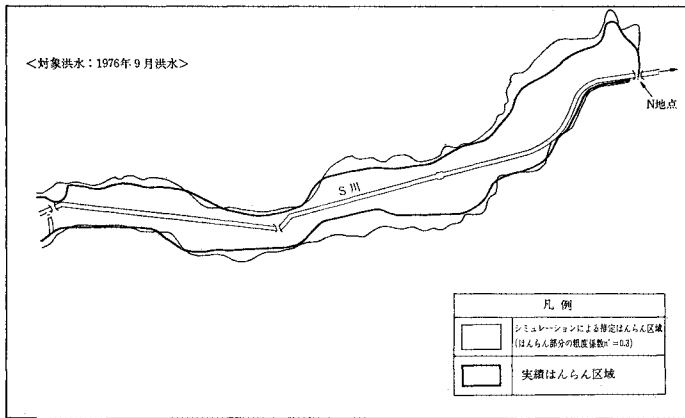
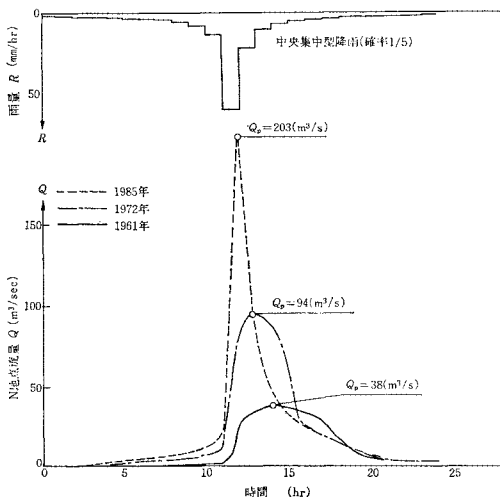


図-7(c) はんらん再現の精度

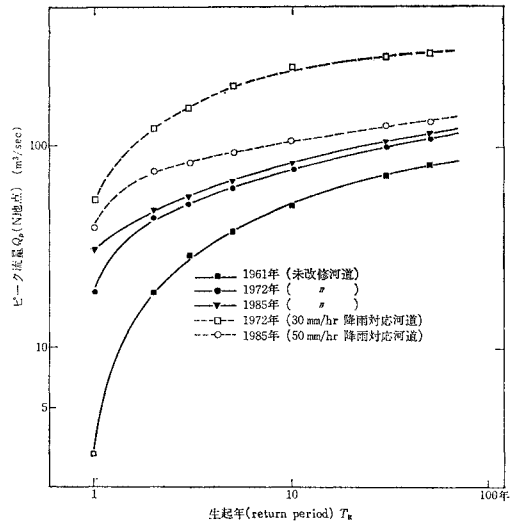
都市化による不浸透面積の増大および水路網の整備により、同じ降雨に対する流出が変化する。この流出の変化状況は、水理・水文モデルによりシミュレーションすることができる。その一例として、図-8(a)に確率 1/5 の降雨に対するN地点の流量がどのように変化するかを示した。同図よりわかるように、明らかな洪水波形の先鋭化が認められ、たとえば 1985 年のピーク流量は 1961 年のものの 5.3 倍にも達している。このような流出の先鋭化の傾向は、比較的小規模な降雨に対して顕著である。また出水時流出総量（表面流出総量）の増大も認められる。図-8(b)はN地点のピーク流量と生起年 (return period) の関係を示したものであるが、これにより、同じ生起確率のピーク流量が都市化の進行とともに増大していることがわかる。同図において、降雨を速やかに排出する河川改修によりピーク流量が増大しているが、後に示すように年平均被害額は軽減される。同様にして、はんらん水位およびはんらん区域の増大も認められるが、ここでは省略する¹⁾。

b) 都市化に伴う洪水被害の増大

治水に対する配慮なしに都市化が進行したとすると、図-9(a)に示すように、洪水被害が増大する^{注9)}。同図には、流域の都市化状況を示す指標として、流域全体の不浸透面積率および棟数も併記している。同図より、この場合には 1972 年時点での価格に変換した実質価格としてみたときに、1985 年の洪水被害は



(a) その 1



(b) その 2

図-8 都市化による流出の変化 (N地点)

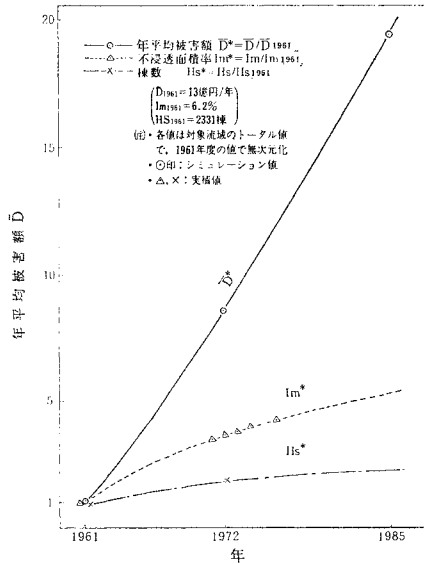


図-9 (a) 治水対策なしに都市化が進行した場合の洪水被害の増大 (不浸透面積率, 棟数を併記)

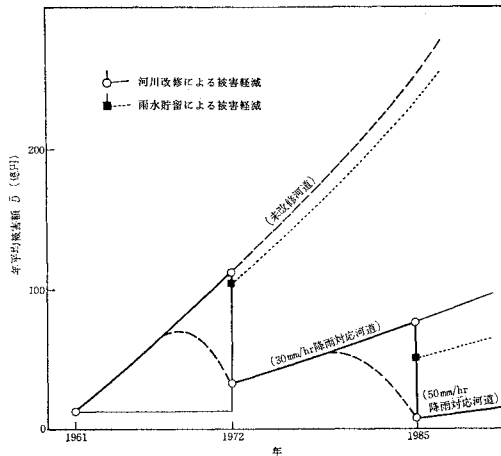


図-9 (b) 治水対策による被害軽減 (1976 年価格)

1961 年の約 20 倍にも達することになる。以下の議論では、各年度の被害額はすべて 1976 年価格に変換して、基準を統一している。図-9 (b) より、河道を 30 mm/hr 降雨および 50 mm/hr 降雨対応河道に改修した場合 (同流域の実施計画目標に一致) には、その被害がどの程度緩和されるかがわかる。ただし、図-9 (b) の太線は、目標年時に一挙に対策が実施されるものとして計算したものであるが、現実には下流から何年間かの時間をかけ

注 9) 水害統計 (1976 年) によれば、河川災害を含む水害被害額は、1975 年価格でみたときに、一般資産等・公共土木施設等・公益事業施設等の被害の比率が 32 : 66 : 2 となっている。本研究では、このうちの水害統計の一般資産等に示される被害のみを推定している。

注 10) 以下では主として河川改修について述べるが、雨水貯留施設についても同様に検討を行っている⁸⁹⁾。

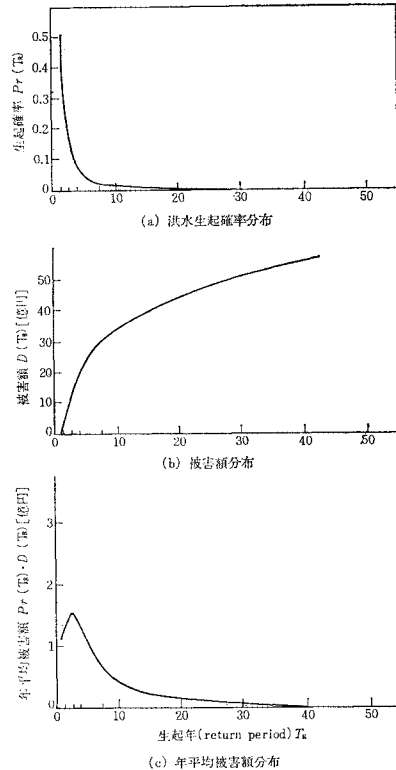


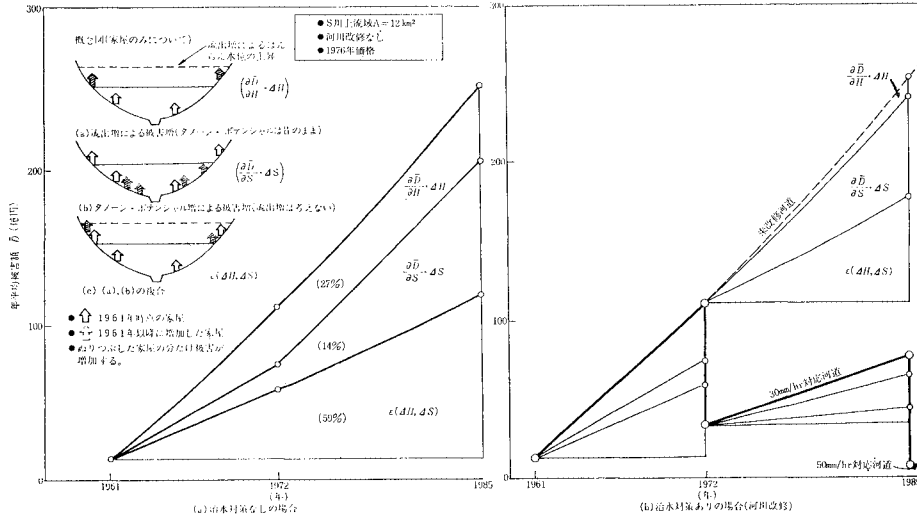
図-10 洪水発生確率 (P_r), 被害額 (D), 年平均被害額 ($P_r \cdot D$) の例示 (1961 年)

て河川改修が行われるので、同図の破線のように徐々に被害は軽減されるはずである。また、同図の点線は、他の治水対策の例として雨水貯留を取り上げ注10)、その適用可能地域を一般居住地・樹木に囲まれた居住地・独立建物地域 (全体に対する適用地域の面積率は 1972 年に 48%, 1985 年に 67%) とし、そのうちの 10% の面積に対して貯留水深を 30 cm として貯留容量を定め、50 mm/hr 降雨に対して最も有効な施設を作ったとした場合の被害軽減状況を示している。

式 (3) に基づく具体的な計算手順と、同流域の年平均洪水被害に対して各生起確率洪水がどのように寄与しているかを例示すると、図-10 のようになる。

c) 洪水災害増大の要因分析

洪水災害の変化は、3. の式 (4) に示すように、都市化による流出の増大、被害ポテンシャルの増大および治水対策の実施による軽減が複合することにより生じる。対象流域において、全増分に対する各項目の寄与の状況がどのようになっているかを、図-11 (a), (b) に示す。同図 (a) の左上に、治水対策を行わない場合 (したがって、第 3 項は零) の式 (4) の第 1 項、第 2 項および第 4 項の意味を概念図で示した。これにより被害増大のメカニズムとその程度 (各項のウエイト) を知ることができ



図—11 年平均被害額増大のメカニズム (要因分析)

る。すなわち、流出増により以前は被害を受けなかったものが被害を受けるようになって増える分 $(\frac{\partial \bar{D}}{\partial H} \cdot \Delta H)$ 、もともと危ないところにおける被害ポテンシャルの増大によって増える分 $(\frac{\partial \bar{D}}{\partial S} \cdot \Delta S)$ および流出増により危なくなった場所で被害ポテンシャルが増大したことにより増える分 $(\epsilon(\Delta H, \Delta S))$ によっており、その比率 (期間内の総額比) は 27 : 14 : 59 となっていることがわかる。図同 (b) は 30 mm/hr および 50 mm/hr 降雨対応河道としての河川改修による治水対策を行ったときの要因分析結果である。

図—11 の $\frac{\partial \bar{D}}{\partial H} \cdot \Delta H$ の項による増分は、治水をめぐる上・下流問題を端的に示している。この上・下流問題は、上流域 (はらん原外とはらん原内を含む) の開発による外部不経済であり、開発に伴う雨水貯留の義務づけなどの背景を示すものとして興味深い。

(4) 都市化しつつある流域の治水対策についての 2, 3 の考察

都市化が進行しつつある流域の治水対策について考える。3. で考察したように、治水対策の効用としては種々のものがあるが、前述のように直接被害の軽減のみを取り上げる。この場合には、費用便益分析において、安全側の評価を行うことになる。治水対策としては、構造的な手段として、河川改修と現地雨水貯留のみを考える。他の立地調整等の非構造的な手法や建築物の耐水化という手法等^{2), 5), 12), 13)} についても類似の検討が可能であるが、ここでは考えない。

a) 河川改修の費用効果分析

S川流域においては、他の多くの都市化中小河川と同

様に、暫定的に 30 mm/hr 降雨対応、50 mm/hr 降雨対応河道へ段階的に河川を改修していく計画が立てられている。河川改修に必要な費用 C は、用地費・構築費・その他付帯費用および維持管理費からなる。

$$C = C^1(\text{用地費}) + C^2(\text{構築費}) + C^3(\text{その他の付帯費}) + M(\text{維持管理費}) \dots\dots\dots (11)$$

式 (11) の $C^1 \sim C^3$ についてはその費用を積算して求めた。費用 M は新たな河川改修による維持費の増分であり、掘込河道では改修による維持費の増加はほとんどないため、本研究では省略した。 $C^1 \sim C^3$ のそれぞれの単位距離当たりの平均的な単価を表—1 に示す。ただし、 $C_{30}^i, C_{50}^{i'}$ はそれぞれ 30 mm/hr 降雨対応河道の改修費用、それに追加的に 50 mm/hr 降雨対応へ改修する費用 (段階的改修)、50 mm/hr 降雨対応河道への一括改修費用の単価を示す。費用算定においては、 C_{50}^i は積み上げにより算定し、 C_{50}^i については $C_{50}^i = C_{30}^i + C_{50}^{i'}$ 、 $C_{50}^2 = C_{50}^{2'}$ 、 $C_{50}^3 = C_{30}^3 + C_{50}^{3'}$ とした。

段階的に改修を進める場合には、図—12 に模式化して示すように、30 mm/hr 降雨対応河道は未改修河道を掘削・浚渫して護岸を施すだけであるが、それをさらに 50 mm/hr 対応河道にするには、30 mm/hr 降雨対応河道の護岸を撤去した後で再び掘削・浚渫しさらに拡幅して護岸を施す。したがって、上記の C_{50}^i の算定では近

表—1 河川改修費用

(単位：万円/m)

各事業費	用地費	構築費	その他	総計
C_{30}	14.76(16%)	74.85(82%)	1.46(2%)	91.07
C_{50}^1	42.03(31%)	93.57(68%)	2.21(2%)	137.81
C_{50}	56.79(37%)	93.57(61%)	3.67(2%)	154.03

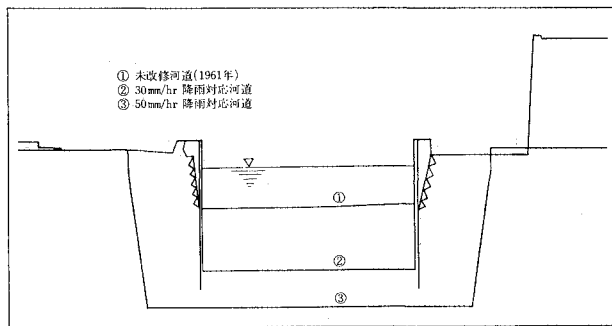


図-12 河川改修断面の例示

似値を与えることになるが、ここでは表-1の値を用いた。

次に被害軽減効果を算定した。これは都市化の程度と改修方法および施設の耐用年数によって定まる。耐用年数は物理的なライフサイクルより定まるといよりは、計画規模が相対的に低いので、次の河川改修のプロジェクトの発生により定まると考える方が現実的である。そこで、ここでは一応改修のライフサイクルを $T_2=1995$ 年、 $T_2=2000$ 年および $T_2=2005$ 年までとして、図-9 (b) に示すような段階的な改修計画による直接被害の軽減による便益 $\bar{D}(A)$ および $\bar{D}(A+B)$ を求めた。そして、現在対象流域で想定されている改修計画の費用効果分析を行うと、 B/C については表-2 に示すような10のオーダーの値を得た。したがって、このような都市化流域における河川改修の効果を被害軽減のみとし、他の効果を考慮しなくても、改修事業の社会的な妥当性は確認されたことになる。これは安全側の評価であり、他の効果まで含めると B/C あるいは $B-C$ の値はさらに大きくなると考えられる。以上の算定においては、被害軽減額および事業費はすべて1976年の価値に変換し(社会的割引率を年率7%と設定した)、その年度の現在価値とした。また、段階的拡張において先行する対策が土地利用や被害ポテンシャルに与えるダイナミズム^{29), 34)}については考慮していない。

b) 改修方式間の比較

前述のように、都市化流域の中小河川の治水計画規模は50 mm/hr 降雨の生起確率が約1/3、30 mm/hr 降雨が約1/1.3 (以上は東京都で確率評価したときの生起確率) といったようにきわめて低い水準にある。したがって今後規模の拡張は必然的に予測される。そこで、治水計画規模の拡張方式(段階的拡張と一括拡張)を取り上げ、その経済的妥当性について検討し、それに現実的な解釈を加えることを試みる。これら2つの方式を考える理由は以下のとおりである。まず、治水に投資できる費用には制約があることを前提とする。これは通常の河川における実状を考慮したことによる。そのような前提のもとで

表-2 費用便益分析の結果

(1976年価値)

T_2 (年)	B/C	B-C (百億円)
1995	10.7	27.1
2000	15.5	40.8
2005	21.1	56.3

(注) この表は30 mm/hr 降雨対応河道が $t_1=1972$ 年に、50 mm/hr 降雨対応河道が $t_2=1992$ 年に、それぞれ一挙に完成されるものとして算定した。

は、短期的に実現できる目標を設定するか、その完成は相当後になるとしても長期的な目標を設定するかが問題となる。治水の面からみて瀕死の状態に近い河川では、シビルミニマムを設定したうえで前者の方式を採用しつつあり^{33), 34)}、ここではその妥当性を費用便益分析という立場から考察してみる。そのために、議論を単純化して、一括拡張方式と段階的拡張方式にそれを近似して取り扱っている。

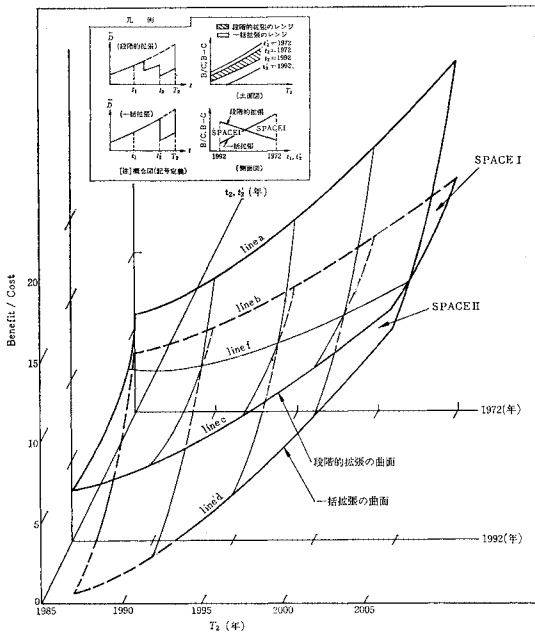
以下では一つの例題として、治水計画規模としては、多くの都市化中小河川の暫定目標として一般に設定されつつある30 mm/hr 降雨対応および50 mm/hr 降雨対応を取り上げた。そして段階的拡張方式としては30 mm/hr 降雨対応に改修した後に、さらにそれを50 mm/hr 降雨対応に改修するものとする。一括拡張方式では50 mm/hr 降雨対応に一挙に改修するものとする。したがって、規模は固定的に与えるので、実施時期決定の問題を考えることになる。

対策の妥当性は、改修時期 t_1, t_2, t_2' (段階的拡張の場合には拡張のタイミング) および便益算定期間 (T のとり方) に依存する。ここに、 t_2, t_2' はそれぞれ段階的拡張および一括拡張の時期(年)である。図-13は1972年より20年間におけるあらゆる拡張ケースに対しての B/C および $B-C$ である。なお、この計算では、15年間のデータから定めた被害ポテンシャル・モデルを約25年にわたって外挿しており、概略的な検討を行ったものである。

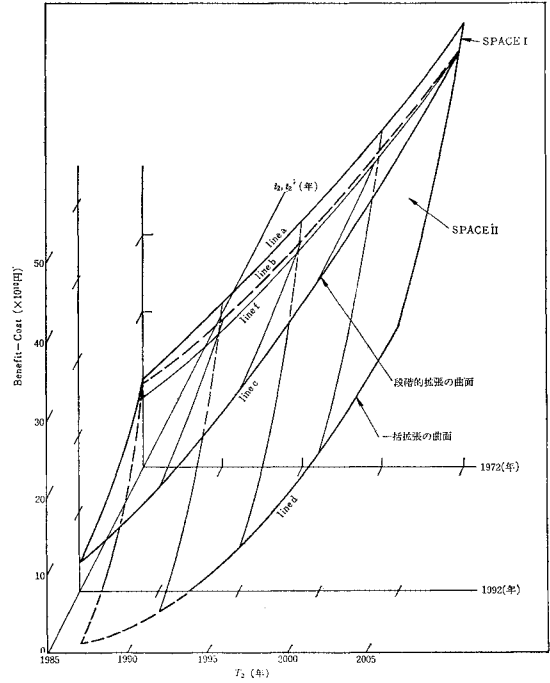
x 軸は便益の算定期間の最終年 T_2 を示し、 y 軸は B/C および $B-C$ を、また x 軸は施設建設のタイミング t_2, t_2' を示している。同図より、 B/C および $B-C$ でみたときに、任意の施設のタイミングとライフサイクルのもとで、それぞれの改修方式の有利な領域を知ることができる。

たとえば図-13 (a) において、line a は1972年 (t_1 年) において50 mm/hr 降雨に対して改修が完了した場合を、また line b は段階的拡張において $t_2=t_1$ とした場合を示しており、いずれも両改修方式において B/C を最も大きくする境界を与える。また、line c, line d はそれぞれ一括拡張方式の実施年 (t_2') を最終年 ($t_2'=t_1+20$) とし、段階的拡張方式で50 mm/hr 降雨に対す

る。



(a) B/C による場合



(b) B-C による場合

図一13 段階的の拡張と一括拡張の効率性の比較

る実施年 (t_2) を最終年 ($t_2 = t_1 + 20$) としたときの B/C を示しており、最もその比を小さくする境界を与える。また2枚の曲面で囲まれる Space I は、段階的の拡張よりも一括拡張の方が B/C でみて有利な領域を、また逆に Space II は段階的の拡張の方が一括拡張よりも有利な領域を示している。両曲面の交線である line f は、両方式の B/C が一致している領域を示している。図一13 (b) は、同様にして $B-C$ でみた場合のものである。

現在のように治水対策が公共事業として行われる場合には、費用は受益者負担ではなく、 B/C あるいは $B-C$ を最も大きくするような方式がそのまま妥当とされるのではない。したがって、限られた財源のもとで B/C あるいは $B-C$ を最も大きくするような方式をとらざるを得ない。その際には、ある程度大きな規模を設定して実施年度を遅くするか、まず小さな規模を設定して早急に対策を実施し、それを段階的に拡張していくことが現実的な課題となる。その際には一般に、 $t_1 < t_2' < t_2$ となる。図一13 に示されるように、このような観点から見ると、同流域において段階的な規模の拡張方式の有利な領域 (Space II) も広く存在している。

暫定目標方式と長期目標方式を段階的の拡張方式と一括拡張方式に近似して考えれば、図一13 に示した分析により、両者の方式の比較が可能である。ただし、その前提としては、通常の河川改修では下流あるいは危険度の高い場所から、年々の予算の許す範囲内で対策が実施さ

れていくが、ここではそのような年々の予算の和が対策に必要な額に達したときに、一挙に施設が完成するとした近似的な取扱いを行うものとする (逐次実施する場合には 図一9 (b) に破線で示すような計算を行えば同様にしてさらに 厳密な扱いが可能である)。このような前提のもとでは、図一13 より暫定目標方式と長期目標方式について、費用便益分析からみた妥当性の比較が可能である。すなわち、図一13 に示すような費用便益分析注 11) を都市化が進行しつつある流域に適用すれば、 T_2 および各年度の投資可能額が与えられたときにとり得る両改修方式 (費用的な制約がある場合に、大規模な改修を将来行うかあるいは小規模に改修を行うか) の比較分析と選定の検討が可能となる。

以上では、治水対策を経済的側面から対象流域全体としてみた場合の (マクロ的観点からの) 評価を試みた。治水安全度は基本的人権にかかわるきわめて公共性の高いものであり、経済的評価のほかに、シビルミニマムとしての水準を想定し得るものである。しかし、限られた予算のもとで水準の向上を図る場合には、改修方式の比較や代替施設の選定において上述のような経済的妥当性の検討は不可欠のものと思われる。なお、計画の規模および対策実施時期を、 B/C あるいは $B-C$ を最大にす

注 11) 方法論的には上述のような近似をしないで厳密な比較を行うことは可能であり、その場合には必要に応じて計算のシナリオを与えるものとして考えている。

る(ただし, $B/C \geq 1$, $B-C \geq 0$) ように決めることに
関しては文献 24)~26) がある。

5. 結 語

都市化が進行しつつある流域において治水計画を立案
するためには, 洪水問題を明確に把握・分析する必要が
ある。本研究では, そのためのシステムティックな分析
手法を提示した。この手法では, すでにほぼ確立されて
いる個々のサブモデルを組み合わせることで, モデル
全体を構成する。このモデルを都市化が進行しつつあ
る流域の洪水問題の分析に適用し, 有効性を検証した。

ケース・スタディでは方法論の検証のほかに, 都市化
流域で生じる典型的な治水問題に着目して, 次のような
ことを明らかにした。

(1) 都市化流域における洪水災害の増大の程度, お
よびそのメカニズムを明らかにした。すなわち, 洪水被
害の増大(軽減)は, ① 都市化による流出増, ② 被害
ポテンシャルの増大, ③ 治水対策による軽減, および
④ ①・②・③の複合として説明されることを示し, そ
の程度を明らかにした。

(2) 洪水被害増大のメカニズムに関連して, 都市化
が進行している流域では, 治水をめぐる上・下流問題が
生じており, 開発には雨水貯留等の保水対策が必要とさ
れることを示した。

(3) 都市化流域における治水対策の費用効果分析を
行い, 治水計画規模が大河川に比較して相対的に低い都
市化中小河川における治水対策の必要性和経済的妥当性
の程度を示した。

(4) 予算制約のもとで, 増大する洪水被害に対処す
る方法として, 施設規模の段階的拡張方式と一括拡張方
式を比較し, それらの有用性の存在領域を示すととも
に, 適正な治水対策の実施方法について検討した。その
結果は, 暫定目標方式と長期目標方式の比較分析に活用
できる。

以上により, 本研究で提示したシミュレーション手法
は, 都市化が進行している地域の治水問題をシステムテ
ィックに分析し, それに対処する方法を検討する手法と
して有効であることが確認された。

今後の課題としては, ① 土地利用調整等の非構造的
手法, 建築物の耐水化等のはんらん原管理を含めた治
水対策の評価, ② 雨水貯留施設と河川改修の評価と比
較³⁸⁾, ③ 評価項目をさらに多角的にするとともに, そ
のために必要なデータの収集方法の検討, ④ 有堤河川
における治水計画の評価, ⑤ 上・下流の安全度(治水
計画規模)の問題についての検討などがあげられる。こ
れらについては現在調査を進めており, 次の機会に報告

したい。

また, 本研究を通じて, 次のような問題点が浮かび上
がってきている。超大規模な洪水時には膨大な被害が生
じるが, そのような洪水の発生確率がきわめて小さいた
めに, 本研究のような費用便益分析では実質的に無視さ
れることになる。また, 当面の被害の軽減と将来におけ
る被害の軽減が同一次元で取り扱われることになる(現
在価値に変換はしている)。治水上瀕死に近い河川では
当面の被害の軽減がきわめて重要である。これらの問題
をいかに考えていくかも今後の課題である。

謝 辞: 本研究を進めるにあたり, 以下の方々のご
指導を受けた。早稲田大学 吉川教授, 東京工業大学
華山教授, 科学技術庁防災センター風水害研究室 青木
室長, 土木研究所水文研究室 石崎室長, 同総合治水研
究室 吉野室長。また, 東京都庁河川課の方々には資料
の収集において便宜を図っていただいた。ここに記して
感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉野文雄・吉川勝秀: 土地利用の変化に起因する洪水災
害の変化の分析と治水対策の評価, 土木技術資料, Vol.
122, No. 2, 1980.
- 2) Ad-Hoc Group of Experts on Flood Damage Preven-
tion U.N.: Flood Damage Prevention Planning in
Developing Countries, 1973.
- 3) 吉川秀夫: 総合的な治水対策について, 建設月報, No.
367, 1980.
- 4) 塩野 宏・吉川秀夫ほか4名: 総合治水対策をめぐって,
ジュリスト, No. 688, 1979.
- 5) Walesh, S.G. and R.M. Videkovich: Urbanization:
Hydrologic-Hydraulic-Damages Effects, ASCE, Vol.
102, No. WR 2, 1978.
- 6) 鶴見川流域水防災計画委員会(会長 吉川秀夫): 中間報告
書, 1977.
- 7) 建設省河川局: 水害統計(annual, 1960年以前は災害統
計).
- 8) 建設省河川局: 治水経済調査要綱, 1970.
- 9) 石原安雄・則武 俊: 年最大洪水流量の変動特性と治水
の安全性について, 第33回土木学会年次学術講演会講演
概要集, 1978.
- 10) 西原 巧: 河川計画における基本量をめぐって—水文学
的立場から—, 河川, No. 341, 1974.
- 11) 広長良一・八島 忠・坂野重信: 低湿地緩流河川の治水
計画について—寝屋川水系の調査から計画樹立まで—,
土木学会論文集, 第20号, 1954.
- 12) Day, J.C. and R.N. Weisz: A Linear Programing
Model for Use in Guiding Urban Floodplain Man-
agement, Water Resources Research, Vol. 12, No. 3,
1976.
- 13) James, L.D.: Nonstructural Measures for Flood Con-
trol, Water Resources Research, Vol. 1, No. 1, 1965.
- 14) McCrory, J.A., L.D. James and D.E. Jones: Dealing
with Variable Flood Hazard, ASCE, Vol. 102, No.
WR 2, 1976.
- 15) 西畑勇夫: 河川の Damage Potential 及び統計資料につ
いて, 第9回建設省技術研究会報告, 1957.
- 16) 橋本 健・長谷川 正: 土地利用の変化を評価する流出

モデル, 土木技術資料, Vol. 19, No. 5, 1977.

- 17) 木村俊晃：狩野川洪水の検討—異常災害に如何に対処するか—, 土木研究所報告, No. 106, 1960.
- 18) 吉川秀夫：河川災害と改良復旧, 季刊防災, No. 47, 1974.
- 19) 石崎勝義：超過外力と河川計画, 土木技術資料, Vol. 17, No. 4, 1975.
- 20) 岩松幸雄・吉川勝秀・金井道夫：公共事業の影響を把握するための地域モデルに関する研究, 土木学会論文報告集, No. 284, 1979.
- 21) 建設省河川局：水害による間接被害額の計測手法に関する研究報告書, 1979.
- 22) 建設省土木研究所：静岡地区 49 年 9 月豪雨災害調査報告, 土木研究所資料, 第 965 号, 1975.
- 23) 山口高志・吉野文雄・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(I), 土木研究所報告, No. 156, 1981.
- 24) Sorensen, K.E. and R.D. Jackson : Economic Planning for Staged Development, ASCE, Vol. 94, No. HY 5, 1968.
- 25) Rachford, T.M. and R.F. Scarate : Time-Capacity Expansion of Waste Treatment Systems, ASCE, Vol. 95, No. SA 6, 1969.
- 26) 吉田 滋：高速道路の段階建設計画 (I), 高速道路と自動車, Vol. XII, No. 3, 1969.
- 27) 長尾義三・森杉寿芳・吉田哲生：非弾力性需要のもとにおける段階建設について, 土木学会論文報告集, 第 250 号, 1976.
- 28) 友野勝義：水道における拡張事業規模の経済, 水道協会雑誌, No. 519, 1977.
- 29) 住友 恒：水道施設における余裕度の評価と分析, 第 6 回土木計画学シンポジウム, 1972.
- 30) 三菱総合研究所：公共土木計画への費用便益分析適用性に関する研究, 1977.
- 31) 岩井重久・石黒政儀：応用水文統計学, 森北出版, 1971.
- 32) 石崎勝義・橋本 健：土地利用の変化に伴う流出機構に関する調査, 土木研究所河川事業調査費報告, 1975.
- 33) Ven Te Chow : Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, INC., 1959.
- 34) 建設省東北地方建設局福島工事事務所：河川改修のインパクト, 1979.
- 35) 石崎勝義・岡田 豊：はん濫を伴う洪水の計算—静岡岡川への適用—, 土木技術資料, Vol. 18, No. 7, 1976.
- 36) Yamaguchi, T. : Damage Potential Increase due to Urbanization, International Association of Hydrologic Symposium, 1975.
- 37) 建設省土木研究所：雨水貯留に関する調査第 3 報, 土木研究所資料, 第 1382 号, 1978.
- 38) 建設省土木研究所：雨水貯留施設の最近の動向, 土木研究所資料, No. 1579, 1980.
- 39) 欠野勝正編：水災害の科学, 技報堂, 1971.
- 40) 中川芳一・飯塚敏夫・梅本良平：治水計画規模の決定に関するゲーム論的研究, 第 23 回水理講演会論文集, 1979.
- 41) Wood, E.F., Rodriguez-Iturbe : Bayesian Inference and Decision Making for Extreme Hydrologic Events, Water Resources Research, Vol. 11, No. 4, 1975.
- 42) Bogárdi, I. and F. Szidarovszky : Induced Safety Algorithm for Hydrologic Design under Uncertainty, Water Resources Research, Vol. 10, No. 2, 1974.
- 43) Wood, E.F. : An Analysis of Flood Levee Reliability, Water Resources Research, Vol. 13, No. 3, 1977.
- 44) 木下武雄：都市化による流出の変化, 土木技術資料, Vol. 9, No. 9, 1967.
- 45) 西田哲夫：第 2 室戸台風の高潮による水害基礎調査研究, 第 16 回建設省技術研究会報告, 1962.
- 46) 吉岡和徳：可能最大降水量の一推定法, 土木技術資料, Vol. 17, No. 8, 1975.
- 47) 土木研究所水文研究室：洪水の水文学的研究の動向, 土木技術資料, Vol. 1, No. 6, 1959.
- 48) 石崎勝義：氾濫原管理—もう一つの洪水防禦対策—, 土木技術資料, Vol. 16, No. 10, 1974.
- 49) 富山和子：水と緑と土, 中公新書, 1974.
- 50) 吉川勝秀・吉野文雄・中島輝雄：流域の都市化に起因する洪水災害の変化, 第 25 回水理講演会論文集, 1981.

(1979.4.24・受付)