

リスクアナリシスによる都市河川の治水計画水準 に関する考察

STUDY ON DECISION MAKING OF FLOOD PROTECTION LEVEL ON A BASIS OF FLOOD RISK ANALYSIS

守田 優¹・荒井 稔²

Masaru MORITA and Minoru ARAI

¹ 正会員 工博 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒108-8548 東京都港区芝浦三丁目 9-14)

² 非会員 工修 水資源開発公団 琵琶湖開発総合管理所 (〒520-0243 大津市堅田二丁目 1-10)

This study presents a flood damage prediction model and a risk analysis method for flood protection level decision. The flood damage prediction model is composed of two models: a flood inundation prediction model (**Model 1**) and a flood damage estimation model (**Model 2**). **Model 1** calculates the inundation depths of a river basin for any given storms. **Model 2**, using the depths obtained by **Model 1**, computes the damage amounts of the private properties as a function of inundation depth. In the calculation process, we fully utilize GIS as a tool for the damage calculations. The models were applied to flood damage simulations for the Kanda river basin with highly urbanized catchment located in the Tokyo Metropolis. The simulations yielded the flood damage for a set of several storms with different return periods. With the calculation results, we carried out a risk analysis for flood protection levels of the Tokyo metropolitan government and proved that the protection level is reasonable and acceptable for engineering viewpoint.

Key words: risk analysis, flood inundation, flood protection level, GIS

1. はじめに

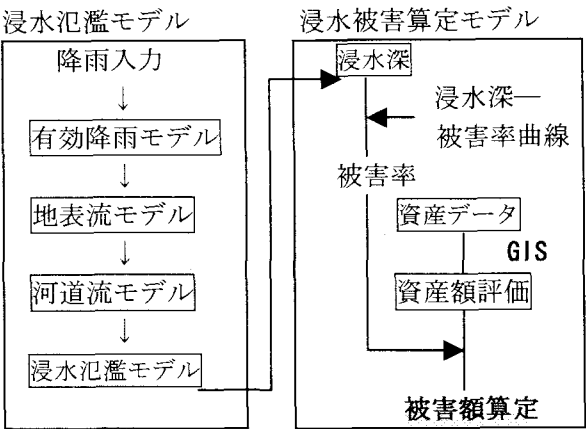
日本の都市は人口と資産が極度に集中した沖積低地や洪積台地に展開しており、水害からの安全性を確保するため、国や自治体は治水事業を進め、治水整備水準をより高くすることが求められる。しかし、長期にわたる公共投資の縮小から治水整備に投入できる予算は限られており、その限られた予算のなかで適正な整備水準を設定することが必要となる。例えば東京都は、河川の長期的な治水整備目標として、現在の時間 50mm (3 年確率) から時間 75mm (15 年確率) にレベルを上げて設定している¹⁾。この治水水準は適正なのか、いかにして正当化されるのか、このような治水整備水準の設定に対して工学的に評価する手法を確立することは重要な研究課題

である。

本研究は、東京都内に位置する典型的な都市河川神田川を対象に、洪水リスクアナリシスにもとづき都市河川の治水整備水準の設定について検討する。災害リスクアナリシスは、地震の分野においては研究が進み、手法もほぼ確立されている²⁾。しかし、浸水害については、地震と異なり、外力である降雨が直接被害を及ぼすわけではなく、降雨は浸水を媒介に被害を与える。そのため、リスクアナリシスを適用する場合、浸水氾濫解析というプロセスが不可欠になる。本研究では、浸水氾濫モデルによる氾濫解析と GIS を援用した浸水被害算定モデルによる浸水被害予測を行い、降雨の発生確率とその降雨による浸水被害を組み合わせ、洪水リスクアナリシスにより、年間浸水リスクを算出し、“リスク”の概念から治水計画水準の設定に関して考察する。

2. 浸水被害予測モデルの構成

本研究ではPCベースの浸水害予測手法として二つのモデルを適用する。すなわち、降雨から浸水氾濫を計算する浸水氾濫モデル (Model 1) と浸水深から被害を算出する浸水被害算定モデル (Model 2) である。この Model 1 と Model 2 は、後述するように、浸水ロス関数、すなわち建物の浸水深と被害率の関係を表現した関数によって結びつけられている。この二つのモデルにより、任意の降雨について、流域の浸水深のみならず、その浸水による被害額を同時に算出することができる。Dutta ら³⁾ はこのような数理モデルについて詳細に記述しているが、著者ら⁴⁾ は、この浸水氾濫モデルと被害額算定モデルを組み合わせ、治水事業による水害軽減効果の費用－便益分析を行なった。図－1 に本研究のモデルの構造を示した。



図－1 浸水被害予測モデルの構成

(1) 浸水氾濫モデル (Model 1)

浸水氾濫モデルは、図－1 に示したように、有効降雨モデル－2次元地表流（下水道を含む）モデル－河道モデル－2次元浸水氾濫モデルから構成される。最後の浸水氾濫モデルでは、河道の天端高を超える流量を浸水氾濫モデルへ入力し、2次元の氾濫水の流れを計算する。

まず、有効降雨の計算については、一定比率でカットする簡略法を採用し、水収支調査とモデルのキャリブレーションにより流出率 $f = 0.6$ に固定した。地表流と浸水氾濫の計算においては Saint-Venant 方程式を拡散波近似して2次元で定式化した式を用い、河道流では同式を1次元で用いている。この地表流モデルの詳細と数値計算上の検討については著者らの論文^{5), 6)} に述べている。特に、河道流の計算で拡散波モデルを用いたのは、2河川の合流によるバックウォーターの効果を重視したためである。

Saint-Venant 方程式を2次元拡散波近似した式は以下のように熱伝導型方程式の形で表せる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial H}{\partial y} + re \quad (1)$$

$$(K_x, K_y) = \left(\frac{1}{n} \cdot h^{5/3} \cdot \left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|^{-1/2}, \frac{1}{n} \cdot h^{5/3} \cdot \left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|^{-1/2} \right) \quad (2)$$

ここに、 H = 水面標高、 K_x, K_y = 拡散係数、 n = マニングの等価粗度 (0.02 に設定)、 h = 水深、 re = 有効降雨。

河道モデルは式 (1) を1次元に書き換えて以下の式とした。

$$\frac{\partial H_c}{\partial t} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} K_c \frac{\partial H_c}{\partial x} + q \quad (3)$$

$$K_c = \frac{1}{n_c} \cdot B \cdot h_c \cdot R^{2/3} \cdot \left| \frac{\partial H_c}{\partial x} \right|^{-1/2} \quad (4)$$

ここに、 H_c = 水面標高、 K_c = 拡散係数、 n_c = マニング粗度係数 (0.02 に設定)、 B = 河道幅、 h_c = 水深、 R = 径深、 q = 側方からの流入量である。

上に示した浸水氾濫モデルの基礎方程式は熱伝導型であり、熱伝導方程式に適用される数値計算スキームの中から、精度、安定性、計算時間の比較検討⁵⁾ をもとに ADE 法を採用した。

(2) 浸水被害算定モデル (Model 2)

浸水による被害は、直接被害と間接被害に分類される。直接被害には、まず家屋や家庭用品、事業所建物や事業所償却資産・在庫資産が物理的に受ける被害があり、これらを一般資産被害という。この他に直接被害としては、本研究では割愛した公共土木施設被害がある。間接被害は、直接被害による営業や事業の中断によってもたらされる。

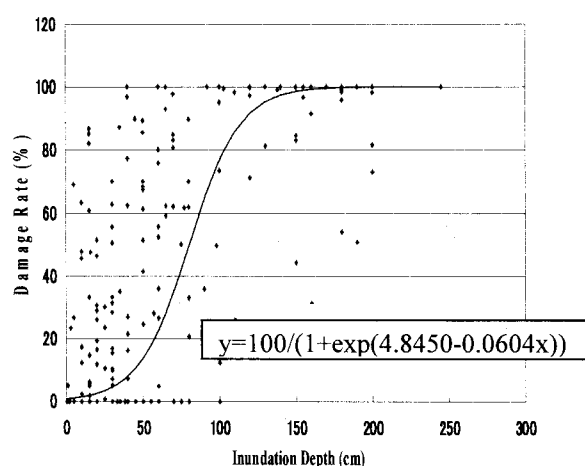
表－1 浸水被害（直接被害）の分類

建物用途	構造（不動産）	動産
民間家屋	木造	家庭用品
	非木造	
事業所建物	木造	在庫資産 製造業
	非木造	償却資産 商業
		サービス業

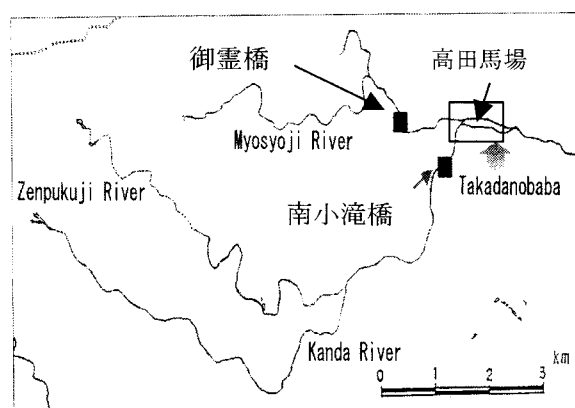
浸水被害を Model 2 で算定するにあたっては、GIS を効果的に利用する。すなわち、流域を 50 m メッシュに分割し、メッシュごとに資産額の合計を算出し、それに Model 1 で計算した浸水深を

重ね合わせ、後述する建物構造や資産の種類に応じて設定された浸水深—被害率曲線（浸水ロス関数）を用いて被害額を算出する。この計算で用いる建物構造・床面積については、東京都都市整備局のGISデータを用いた。

浸水被害額を計算するには、民間の家屋や事業所の資産額に、浸水深によって決まる被害率を乗じて算出する。家屋や建物の被害は、床下浸水か床上浸水かで異なる。床上浸水については、浸水深—被害率曲線（浸水ロス関数）を適用する。この浸水ロス関数は、表—1に示したように11種類（建物被害4種類・動産被害7種類）の直接



図—2 浸水深—被害率曲線（浸水ロス関数）の例：事業所償却資産



図—3 神田川流域の概要

被害について、旧建設省による浸水被害データ⁹⁾、¹⁰⁾から作成した。図—2には、浸水ロス関数の一例として、商業系事業所の償却資産のカーブを示した。プロットした被害データからの回帰曲線はS字型のロジスティック曲線であり、浸水深と被害の関係をうまく表現している。すなわち、床下では被害が小さく、床上で浸水深が大きくなる

につれ被害は増大し、ある深さを超えると被害はそれ以上増加しない。ここで建物の床の高さは、民家で50cm、事業所ビルで25cmに設定した。

間接被害は、浸水深と営業中断日数の関係¹⁰⁾から、営業停止日数に就労人口当たり1日当たり付加価値額を乗じて求めた。

3. 浸水被害予測モデルの適用

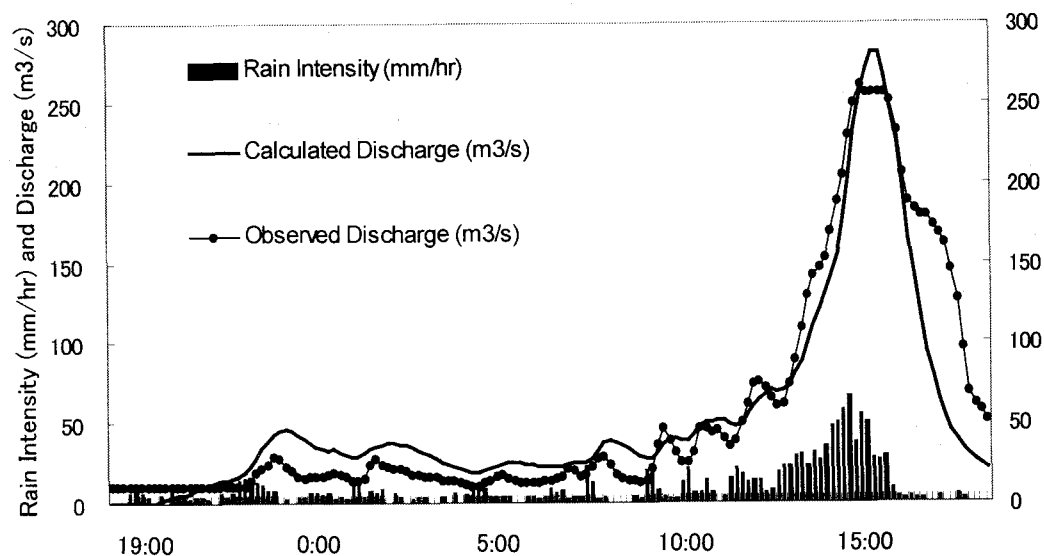
浸水被害予測モデルを東京都に位置する神田川流域に適用した。神田川流域は、面積80.6km²であり、国内でも人口と資産が極度に集中した都市河川である。図—3に神田川の上流域の概要を示した。本解析で対象とする神田川は、洪積台地を削る掘り込み河道であり、堤防は存在しない。東京都は、浸水被害を抑えるため、さまざまな治水事業を実施してきたが、特に、高田馬場分水路（1982年竣工）と環七地下調節池（1997年竣工）はその代表例である。著者ら⁴⁾は、前者の高田馬場分水路の建設について事業効果—費用便益分析をすでに行なっているが、本論文においても、浸水被害の計算は、神田川の主要な浸水域であった高田馬場周辺地区（図—3で四角に囲った地区）を対象とする。

（1）浸水氾濫モデルの流出計算の検証

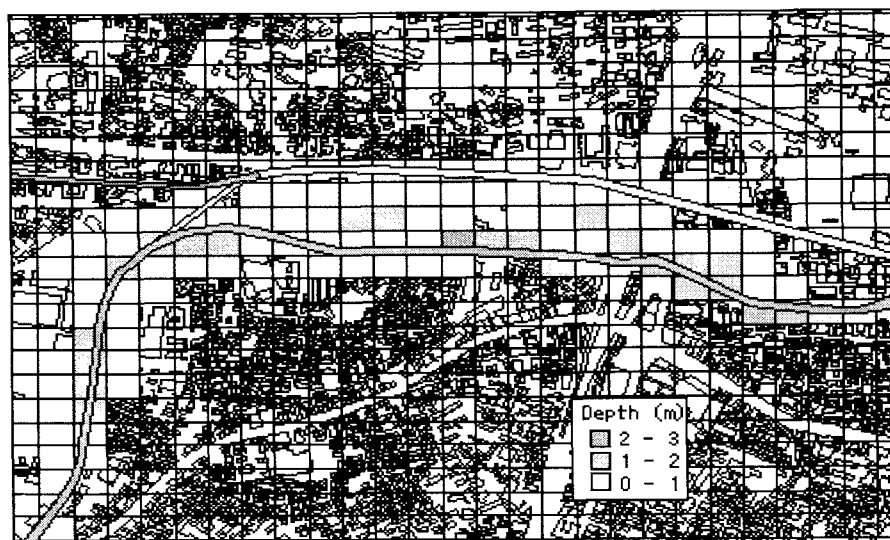
浸水被害予測モデルを適用するにあたり、まず浸水氾濫モデル（Model 1）の検証を行なった。検証には、御霊橋と南小滝橋の2地点について東京都河川部の降雨・水位データ（流量に変換）を用いた。図—4に、1982年9月11日～12日の洪水について、計算値と実測値を示した。両者を比較すると、降雨の前半で計算値がやや大きく、またピークにおいて計算値が、平坦な形の実測値より上になっている。前者は、計算に初期損失を考慮していないこと、後者については、南小滝橋観測所の浸水によりピーク時の観測値が得られていないことが理由である。概ね計算値は実測値を再現できている。

浸水氾濫についてはすでに述べたとおり、2次元地表流を50mメッシュで計算した。計算単位時間は安定性を考慮し、 $\Delta t = 1.0 \text{ sec}$ とした。図—5には、時間67.5mm（後述する浸水リスクが最も大きい降雨レベル）の中央集中型降雨による浸水氾濫計算の例を示した。なお、浸水氾濫についての検証も必要であり、1982年9月11日の東京都の浸水実績図を参考に氾濫域についてチェックした。実績氾濫域が計算氾濫域よりわずかに大きい結果となったが形状はほぼ再現できた。

なお、本浸水氾濫モデルは、流域スケールのマクロな流れを対象とし、下水管の流れや内水氾濫



図－４ 浸水氾濫モデルの流出計算の検証（南小滝橋：１９８２年９月１１日～１２日）



図－５ 高田馬場地区の浸水氾濫モデルによる計算例（時間 67.5mm の中央集中型降雨による氾濫域を GIS データと重ね合わせて表示）

は２次元流のなかに含めて計算した。氾濫計算において、建物占有部分は地表面粗度係数や浸水深の計算に補正を必要とするが、この補正については、浸水実績図との比較において調整を行なった。

（２）浸水被害算定モデルの計算例

浸水氾濫モデルから計算した浸水深から、浸水深－被害率曲線を用いて被害率を算出した。この被害率と家屋評価価額等を乗じて被害額を求めた。図－６は、高田馬場地区で想定被害額が最も大きいメッシュについて、その算定結果を浸水被害種別に示したものである。このメッシュには、民家４軒と３事業所が存在するが、想定被害額の内訳では事業所建物被害、償却在庫資産の被害が多くなっている。

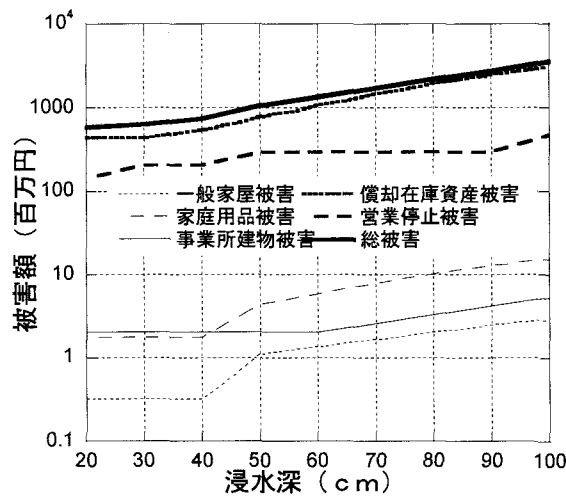
４．洪水リスクアナリシスと考察

洪水リスクアナリシスでは、降雨の発生確率と降雨による被害を“リスク”という概念で結びつける。洪水リスクマネジメントの枠組みとそこでのリスクアナリシスの位置づけについては、Plate⁷⁾が明快に説明している。また、米国の Army Corps における治水計画におけるリスクアナリシスの導入の経緯について、Davis⁸⁾による報告がある。

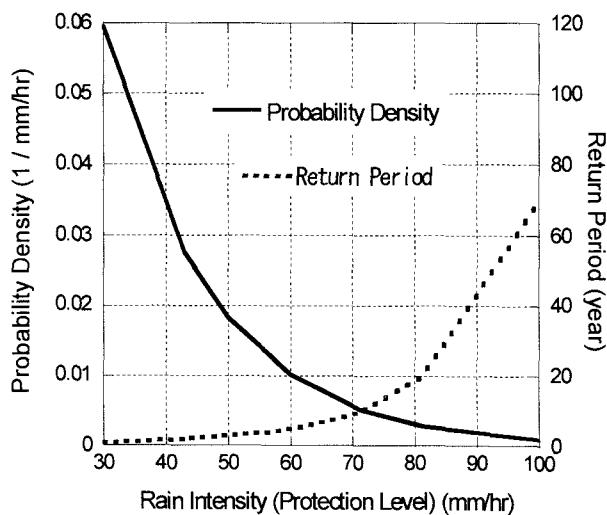
（１）降雨ハザード曲線

さて、東京都では、治水計画における降雨強度の設定に際して、Gumbel 極値分布に基づき、降雨強度式とリターンピリオドを対応づけている。

通常、計画降雨レベルは降雨強度式の1時間降雨強度をもって表現している。最初に述べたように、都は長期治水計画として時間75mm（15年確率）を治水整備水準として設定している。東京都が



図－6 浸水被害算定モデルによる計算例



図－7 降雨強度と確率密度とリターンピリオッドの関係

採用している降雨強度式をもとに、1時間降雨強度を横軸に、確率密度、リターンピリオッドを縦軸に、これらの関係を示したのが、図－7である。リターンピリオッドは超過確率と結びつくが、この超過確率の回帰式を降雨強度で微分して確率密度を求めた。図－7は降雨ハザード曲線である。

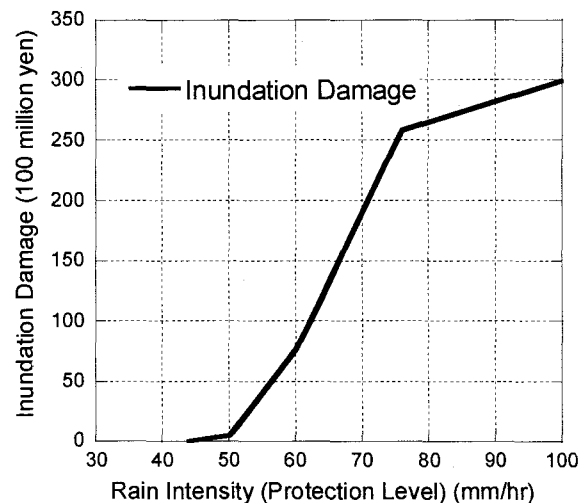
（2）降雨レベルと被害額の関係

次に、浸水氾濫モデルにより、異なった降雨レベルによる浸水深とそれによる被害を計算した。降雨強度式をもとに、リターンピリオッドに対応する中央集中型のハイトグラフを作成し、それを浸水氾濫モデルに入力した。なお、計算において、神田川流域の河道断面、土地利用や人口・資

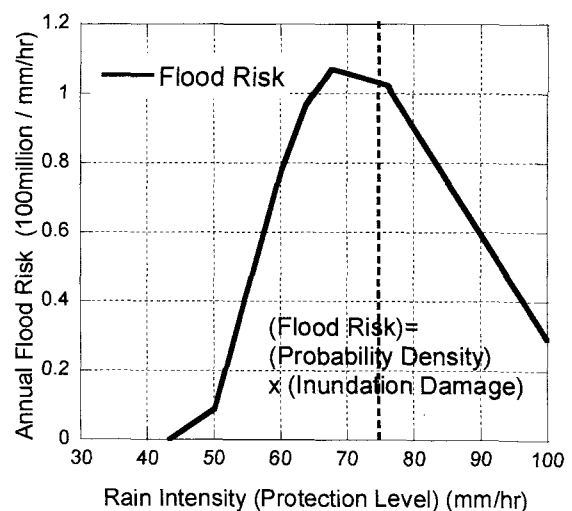
産については現状のままとし、高田馬場分水路や環七地下調節池などの治水施設は除外して条件を設定した。入力した降雨は、時間30mm, 40mm, 50mm, 55mm, 60mm, 63.75mm, 67.5mm, 76mm, 100mmであり、それぞれのハイトグラフについて対象領域のメッシュごとに浸水深を計算した。そして最大浸水深を浸水被害の算定に用いた。

この最大浸水深から浸水深－被害率曲線を用いて被害率を求め、資産額に被害率を乗じて被害額を算定した。そして、各メッシュの被害額を合計して総被害額を計算した。こうして、降雨強度を横軸に、想定被害額を縦軸にプロットしたものが図－8である。

これまでの洪水リスクアナリシスでは、浸水深と被害の関係から浸水リスクが議論されてきた。そのため、降雨と浸水による被害を直接結びつけて議論することができず、本研究で目的としてい



図－8 計画降雨レベルと浸水被害の関係



図－9 計画降雨レベルと浸水リスクの関係

る治水計画水準に関する考察ができなかった。この図-8に示した治水計画水準に対応する降雨強度と浸水被害の関係を浸水氾濫解析で計算することにより、合理的な治水計画水準の設定という実用的な課題にアプローチすることができる。

(3) 降雨レベルと浸水被害リスク

洪水リスクアナリシスでは、外力である降雨の発生確率とその降雨による被害を乗じて浸水のリスクを評価する。そこで、図-7における降雨レベルの発生確率と図-8に示した降雨レベルに対応する被害額を乗じて年間浸水リスクを算出した。そして、降雨強度と浸水リスクの関係を示したのが図-9である。この図から、時間 67.5mm 付近に浸水害リスクのピークを読み取ることができる。

一般に、規模の小さい洪水は発生確率が高いがそれによる浸水被害は小さい。逆に、規模の大きい洪水は、一度発生したときの被害は大きいものの発生頻度は少ない。そこで年平均でみると、外力である降雨の発生頻度と発生被害を乗じたものが浸水リスクを表していると考えることができる。

これまで、都市河川の治水計画においては、治水安全度を高めるため、財政的制約の範囲内でより高い治水水準が求められてきた。しかし、水害をリスクという観点から捉えたとき、浸水リスクが最も高い降雨レベルを考慮して治水水準を設定することが治水事業の目標として合理性があると考える。そして、浸水リスクがピークより大きい極度に高い降雨レベルについては、治水事業ではなく、いわゆる“危機管理”として、治水事業とは異なる水準の問題として設定すべきであろう。

東京都は、すでに述べたとおり、治水事業の長期計画として、時間 75mm (15 年超過確率) を設定している。この降雨強度は、図-9に示した年間浸水リスクの計算結果から、浸水リスクのピークを越えたところに設定されており、その意味でこの治水整備水準は、適正で合理性をもつものと判断することができる。

5. おわりに

本研究では、洪水リスクアナリシスにより都市河川の治水計画水準の設定について考察することを目的としたが、以下の成果が得られた。

- (1) 浸水氾濫モデルと浸水被害算定モデルから構成される統合モデルを用いて洪水リスクアナリシスの枠組みをつくった。
- (2) 東京都の代表的な都市河川である神田川を対象に浸水氾濫解析と浸水被害算定モデルによってリターンピリオッドの異なる降雨による想定浸水被害額を算定した。

- (3) 洪水リスクアナリシスにより、神田川における浸水リスク特性を明らかにし、東京都の治水長期計画の整備水準、時間 75mm について、その合理性について検証することができた。

今後の課題として、浸水氾濫モデルの精度の向上とパラメータの不確定性に関する検討、より多くの水害統計にもとづく浸水ロス関数の信頼性の向上があげられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、エーオン リスクサービスの福田誉行氏に助言いただいた。また神奈川県・宮田敏郎氏、みらい建設工業・笹本直也氏に計算の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 東京都建設局：総合治水対策調査委員会報告書，1986。
- 2) 例えば，星谷勝，中村孝明：構造物の地震リスクマネジメント，山海堂，2002。
- 3) Dutta, D., Herath, S. and Musiak, K.: A mathematical model for flood loss estimation, *Journal of Hydrology*, Vol.277, pp.24-29, 2003。
- 4) Morita, M. and Fukuda, T.: Decision support system for flood control facility planning based on inundation simulation and flood damage estimation using GIS, *Proceedings of 9th international conference on urban drainage*, Portland, USA, 2002。
- 5) Morita, M and Yen, B.C.: Numerical method for conjunctive two-dimensional surface and three-dimensional subsurface flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.32, pp.921-957, 2000。
- 6) Morita, M and Yen, B.C.: Modeling of conjunctive two-dimensional surface- three-dimensional subsurface flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.128, No.2, pp.184-200, 2002。
- 7) Plate, E.J.: Flood risk and flood management, *Journal of Hydrology*, Vol.267, pp.2-11, 2002。
- 8) Davis, D. W.: Risk analysis in flood damage reduction studies – The Corps Experiences, *Proceedings of EWRI*, ASCE, Philadelphia, 2002。
- 9) 建設省土木研究所河川部都市河川研究室：水害被害の実態調査に基づく一般資産の被害率の推定，1995。
- 10) 建設省土木研究所：治水経済調査マニュアル，1998。

(2004. 9. 30 受付)