

松江低平地における内水氾濫の危険性と その浸水被害軽減策に関する検討

INUNDATION DUE TO HEAVY RAINFALL AND FLOOD MITIGATION PLAN IN THE MATSUE LOW-LYING AREA

川池健司¹・市川 温²・丸山寛起³・内藤正彦⁴

Kenji KAWAIKE, Yutaka ICHIKAWA, Hirotatsu MARUYAMA and Masahiko NAITO

¹ 正会員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

² 正会員 博(工) 京都大学大学院助手 地球環境学堂 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³ 正会員 修(工) 国土交通省 宮崎河川国道事務所 (〒880-8523 宮崎市大工2丁目39)

⁴ 正会員 国土交通省 出雲河川事務所 (〒693-0023 島根県出雲市塩冶有原町5-1)

In this study, a numerical simulation model for inundation flow due to heavy rainfall is developed and applied to the Matsue low-lying area. Using this model, hazardous areas against heavy rainfall in the Matsue low-lying area are designated. Then, as an application example of this model to the flood mitigation plan, the effect of pump capacity extension and a hypothetical water gate is discussed. Consequently, the best way of flood mitigation in the Matsue low-lying area is assumed to be draining the rainwater to the Asakumi River through the channel network and extending the pump capacity of the Suetsugu pump station.

Key Words : Inundation flow analysis, heavy rainfall, low-lying area, flood mitigation plan

1. はじめに

島根県東部を流れる斐伊川は、中国山地に源を発し、南流して宍道湖に注ぐ一級河川である。宍道湖の水は大橋川を流下して中海に注ぎ、境水道を経て日本海につながっている。図-1に斐伊川流域を示す。流域面積は、斐伊川上流域が920km²、宍道湖直接流入流域が400km²、中海直接流入流域が750km²、全体で2,070km²となっている。

斐伊川下流部に位置する宍道湖と中海の、それぞれの計画高水位はH.P.+2.50mとH.P.+1.44mで、宍道湖—大橋川—中海—境水道間の水面勾配が非常に緩いため、宍道湖の水位がなかなか低下せず洪水が長期化しやすい地形になっている。また、二つの湖をつなぐ大橋川は河道断面が小さく疎通能力が小さい河川であり、宍道湖の洪水の排水がスムーズに行われないうえに周辺地域では洪水氾濫が頻繁に発生している。

島根県の県庁所在地である松江市は、人口19万人の中規模都市で、宍道湖から大橋川に流下する付近の低平地に立地しており、大橋川の兩岸に市街地が広がっている。松江市は、地盤が低平だけでなく、大橋川の沿川にほとんど堤防がないために度重なる洪水被害

に悩まされてきた。写真-1、写真-2は1972年(昭和47年)7月9～13日水害時の市内の様子である。この水害により、松江市では全半壊家屋13戸、床上浸水5,612戸、床下浸水14,201戸にのぼる被害を受けた。幸いなことに、近年では1972年(昭和47年)以降大規模な洪水被害は発生していない。しかし、松江市の地形的条件は抜本的に改善されたわけではなく、ふたたび大規模な洪水被害を受けてもおかしくない状況に変わりはない。そこで、このような洪水被害を軽減するため、国土交通省では(1)斐伊川上流域でのダム建設、(2)斐伊川中流域での斐伊川放水路の建設、(3)大橋川の改修の3事業からなる治水計画を現在進めている。

ところが、これらの対策が実施されて斐伊川水系の洪水が安全に流下するようになったとしても、現在の松江市では、雨水排水対策がほとんど手付かずの状態であり、集中豪雨などによる内水氾濫に対して安全であるかどうかは明らかでない。

そこで本研究では、松江市街地の広がる低平地を対象として、数値シミュレーションによって松江市内での雨水の挙動を適切に捉えるとともに、内水氾濫に対する危険度を評価することを目的としている。さらに、この数値シミュレーションモデルを用いて、仮定の排水機場、水門等を想定し、効果的な松江市の内水氾濫

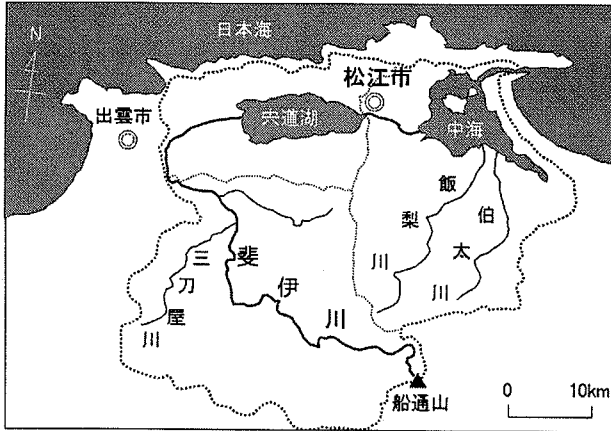


図-1 斐伊川流域

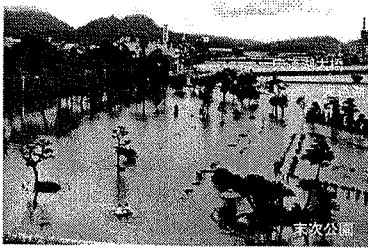


写真-1 昭和47年水害時の末次公園



写真-2 昭和47年水害時の松江駅前通り

対策のあり方について検討を行う。

2. 内水氾濫解析モデルの概要

(1) モデルの概要

松江市における内水氾濫の危険性を検討するため、本研究では、松江市街地での平面二次元氾濫解析、市街地の隣接斜面での流出解析、松江市の雨水の排水先となる大橋川・朝酌川の一次元不定流解析、さらに朝酌川の上流端境界条件とするための朝酌川流域での流出解析を統合した解析を行う。このうち、平面二次元氾濫解析と一次元不定流解析は同時に計算する。

a) 市街地の平面二次元氾濫解析

市街地では、水路網や道路網等の複雑な境界を適切に表現するため、非構造格子モデルを用いた氾濫解析¹⁾を行う。用いる基礎式は、以下の浅水方程式とする。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} &= -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 h :水深、 H :水位、 u, v : x, y 方向の流速、 M, N : x, y 方向の流量フラックス ($M = uh, N = vh$)、 r :降雨強度、 n :Manningの粗度係数、 g :重力加速度である。

b) 隣接斜面の流出解析

低平地に隣接する斜面のうち、低平地に雨水が直接流出してくる場所では、中間流・表面流統合型kinematic waveモデル²⁾を用いて流出解析を行い、斜面下流端での流出流量を求める。基礎式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = B \cdot r \quad (4)$$

$$\begin{cases} \text{i) } 0 < A \cos \theta < B \gamma D \text{ のとき} \\ Q = \frac{k}{\gamma} A \sin \theta \cos \theta \\ \text{ii) } B \gamma D < A \cos \theta \text{ のとき} \\ Q = \frac{\sqrt{\sin \theta}}{n} (A \cos \theta - B \gamma D)^m + \frac{k}{\gamma} A \sin \theta \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 k :透水係数、 γ :空隙率、 D :A層厚、 B :斜面幅、 θ :地表面勾配、 m :定数で5/3を用いる。

c) 河川網の一次元不定流解析

河川網では、次の連続式とSt. Venant式を特性曲線法により解くことで、一次元不定流解析³⁾を行う。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (6)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = s_0 - s_f \quad (7)$$

ここに、 A :流水断面積、 Q :流量、 q : x 方向の単位長さあたりの横流入流量、 s_0 :水路底勾配で、基準面から河床までの高さを z とすれば、 $s_0 = -dz/dx$ 、 s_f :摩擦勾配で、抵抗則としてManning公式を用いるとき、 $s_f = n^2 u |u| / R^{4/3}$ 、 R :径深である。

d) 流出解析

流域を斜面と河道に分割し、kinematic waveモデルを用いて下流端での流出流量を求める⁴⁾。斜面、河道に用いた基礎式は、それぞれ以下になる。

<斜面流>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q'}{\partial x} = r \quad (8)$$

$$q' = \alpha h^m \quad (9)$$

ここに、 q' :斜面単位幅流量、 r :降雨量、 α, m :定数であり、斜面勾配 θ_s とManning則を用いると $m = 5/3$ 、 $\alpha = \sqrt{\sin \theta_s} / N$ 、 N :等価粗度である。

<河道流>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{q_s}{B_s} \quad (10)$$

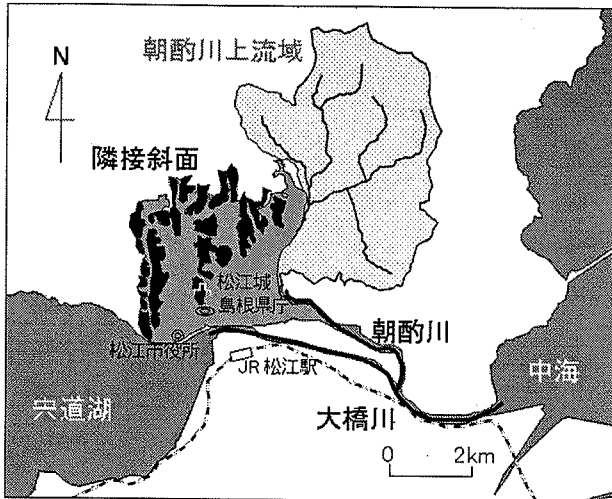


図-2 対象領域

$$q = \alpha h^m \quad (11)$$

ここに、 q : 河道の単位幅流量、 q_s : 斜面からの単位長さあたりの横流入流量、 B_s : 河道幅である。河床勾配を θ とすると、 $m = 5/3$ 、 $\alpha = \sqrt{\sin \theta} / N$ である。

(2) 松江市街地周辺への適用

本研究における松江低平地と隣接斜面、大橋川・朝酌川河川網、朝酌川流域それぞれの解析対象領域は、図-2に示すとおりとする。

a) 松江低平地

図-3は、大橋川以北の松江市街地のうち、低平地部分を非構造格子に分割したものであり、あわせて各格子の地盤高も示している。領域の北側および西側境界は山地に面しており、南側境界は宍道湖と大橋川、東側境界は朝酌川に面している。また図-4は、それぞれの解析格子を「市街地」、「道路」、「水路」、「水田・耕作地」の4つの属性に分類したものである。全格子数は3,179個で、そのうち水路格子は263個、道路格子は578個である。それぞれの属性の格子には、粗度係数の値として0.067, 0.043, 0.020, 0.040を用いることによって、道路網や水路網を氾濫水が流れやすいという特性を表現する^{5), 6)}。

松江市は「水の都」とも言われており、松江城の堀を中心として市街地には写真-3のような水路が縦横に走っている。これらの水路は氾濫水の挙動に大きく影響すると考えられるため、水路格子の地盤高を周囲の格子よりも低くすることによって、これらを長方形断面の水路として表現する¹⁾。ただし、水路網の詳細な情報が得られなかったため、現地調査での目視により、水路格子の地盤高は周囲より3m低いという仮定を用いる。

松江市内には、図-5に示すように、2機の排水機場(末次排水機場: 9.92m³/s, 上迫子排水機場: 5.4m³/s)と4箇所の水門が設置されている。解析では、これらの施設は計算開始時刻より稼動するものとする。

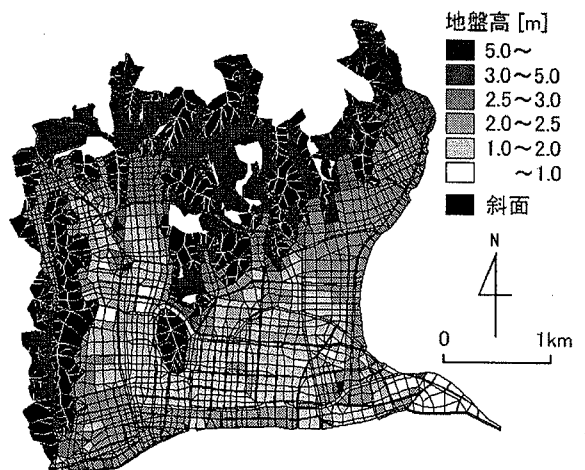


図-3 解析格子

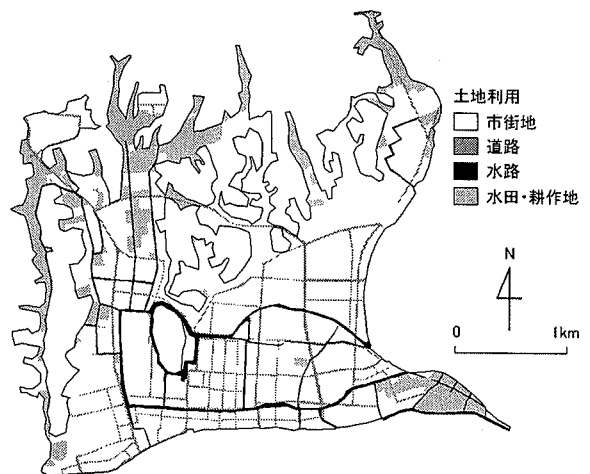


図-4 土地利用

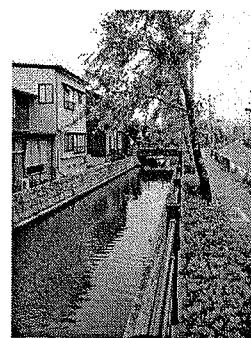


写真-3 松江市内の水路

b) 隣接斜面

松江低平地に隣接する斜面は、図-3に示すように、608個に流域分割した。解析に用いる D は0.5m、 γ は0.15、 k は0.002、 n は0.030とする⁷⁾。

c) 大橋川・朝酌川河川網

大橋川・朝酌川河川網の対象区間は、図-2に示すように、大橋川では宍道湖からの流入点から中海への流出点までの7.5km、朝酌川では百足橋から大橋川合流

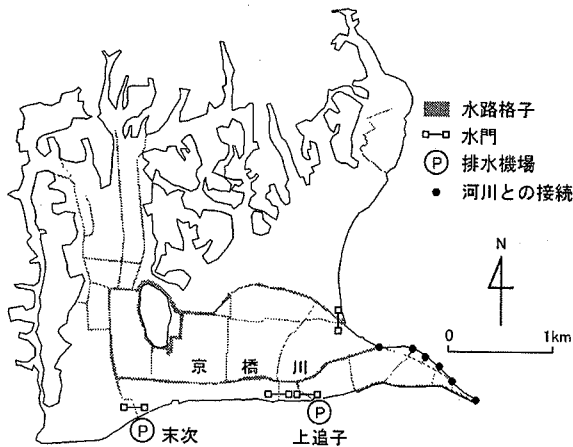


図-5 排水施設

点までの3.7kmとする。大橋川では50m間隔で150断面を、朝酌川では100m間隔で37断面を設ける。大橋川の上・下流端境界条件には、それぞれ矢道湖、中海の水位を用い、朝酌川上流端境界条件には、朝酌川上流域での流出解析結果を用いる。大橋川・朝酌川河川網と松江低平地の水路は、図-5に示す位置で接続しているので、河川断面での水位を境界条件として水路格子に与える。

d) 朝酌川上流域

朝酌川上流域は、図-2に示す領域であり、斜面と河道に分割する。斜面は25個に分割し、河道には100m間隔で196の断面を設ける。斜面の等価粗度は1.0、河道の粗度係数は0.030とする。この流出解析で得られた流出流量を、河川網の朝酌川上流端境界条件（百足橋地点での流量）として用いる。

3. 解析結果

(1) 2001年6月出水時の再現計算

松江市街地では、内水氾濫による浸水被害が報告された事例がないため、近年の降雨で比較的強度の強かった2001年6月18～20日の出水時の再現計算を行うことで、本解析モデルの簡単な検証を行う。このときに松江市で観測された降雨強度、ならびに矢道湖と中海の観測水位を図-6に示す。この降雨を松江低平地と隣接斜面、ならびに朝酌川上流域に一樣に与え、矢道湖と中海の水位を大橋川の上・下流端境界条件として与える。

解析の結果、0.2m以上の浸水深に達したのは、図-7に示す地域のみであった。したがって、一部の地域を除いて浸水域はほとんど見られないことから、本解析モデルによって松江低平地の雨水排水機能がある程度適切に表されていることが確認できた。

(2) 豪雨に対する内水氾濫の危険性

つぎに、近年のわが国で水害を引き起こしている豪雨が松江市に降った場合の、松江低平地の浸水危険性

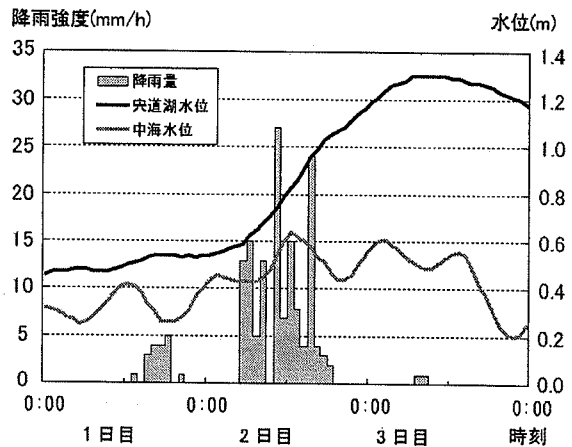


図-6 再現計算に用いた降雨強度と矢道湖・中海の水位



図-7 2001年6月出水の再現計算による浸水域

を検討する。解析に用いた降雨は、最近の豪雨で日本海側の地点で観測されたものという理由から、2004年7月12日0:00～15日0:00に新潟県栃尾市で観測された新潟豪雨災害時の降雨とする。大橋川の上・下流端境界条件には、それぞれ2001年の出水時に観測された矢道湖、中海の水位を用いるが、大橋川の極端な水位上昇の影響を見るために、矢道湖の水位ピークを観測値よりも50cm上昇させることにする。これらの解析条件を図-8に示す。

解析によって得られた最大浸水深を図-9に示す。図より、松江低平地において新潟豪雨災害程度の豪雨が発生した場合、現状の排水対策では広範囲にわたって浸水被害が発生する可能性があることがわかる。さらに別の解析ケースとして、降雨のピークと矢道湖の水位のピークが同時に現れる場合の解析を行った結果、最大浸水深はさらに大きくなるという結果が得られた。

(3) 浸水被害軽減策の検討

前節のように豪雨による浸水被害が発生した場合、現在の排水施設に対してどの程度の策を講じれば浸水

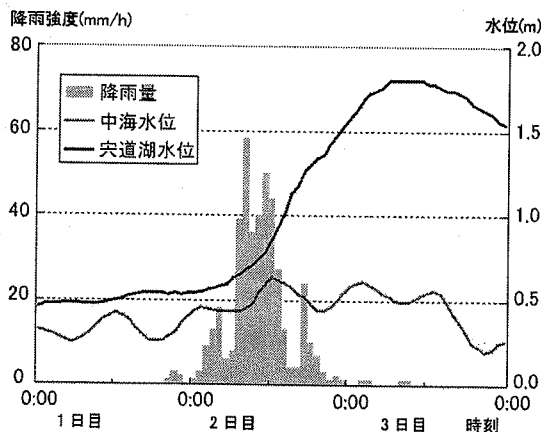


図-8 新潟豪雨を用いた計算の条件

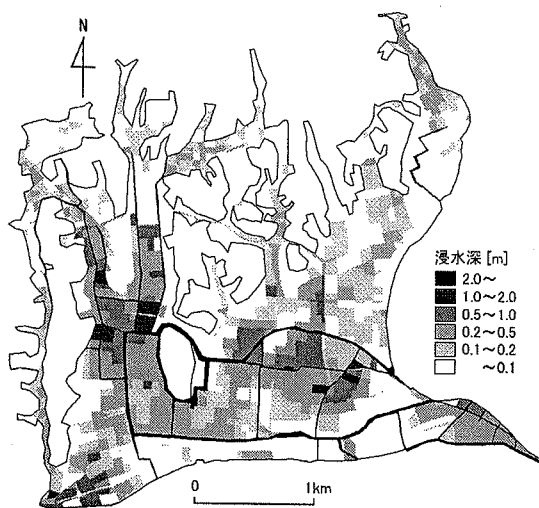


図-9 新潟豪雨を用いた計算による最大浸水深

被害が軽減されるのかを検討する。浸水被害軽減策としては、図-5中の2機の排水機場の能力をそれぞれ $50\text{m}^3/\text{s}$ まで増強させるとともに、京橋川と朝酌川の境界に仮想の水門を新設して、大橋川・朝酌川河川網と松江低平地の水路とを分離させるという3つの対策を考える。これを、表-1のように組み合わせて7パターン（現状をパターン0とする）の解析を行い、それによる浸水抑制効果を検討する。

解析によって得られた、パターン4と7の浸水深について、パターン0（図-9）からの変化を図-10、図-11に、すべてのパターンにおける 0.1m 以上の浸水面積とパターン0からの浸水面積増減量を表-2に示す。図-10、図-11より、排水機場の能力を増強させることによって、広い範囲で浸水深を軽減できていることがわかる。しかし、京橋川水門を閉じることにより、低平地の雨水が朝酌川に排水されず、水門を閉じたすべてのパターンで水門付近の浸水深が大きくなった。また、パターン0と3、1と5、2と6、4と7を比較することによって、水門を閉じることにより排水機場の排水容量を増強させてもその効果が打ち消されていることがわ

表-1 浸水抑制対策の組み合わせ

パターン	末次 排水機場 [m^3/s]	上迫子 排水機場 [m^3/s]	京橋川水門
0	9.92	5.4	開
1	50.0	5.4	開
2	9.92	50.0	開
3	9.92	5.4	閉
4	50.0	50.0	開
5	50.0	5.4	閉
6	9.92	50.0	閉
7	50.0	50.0	閉

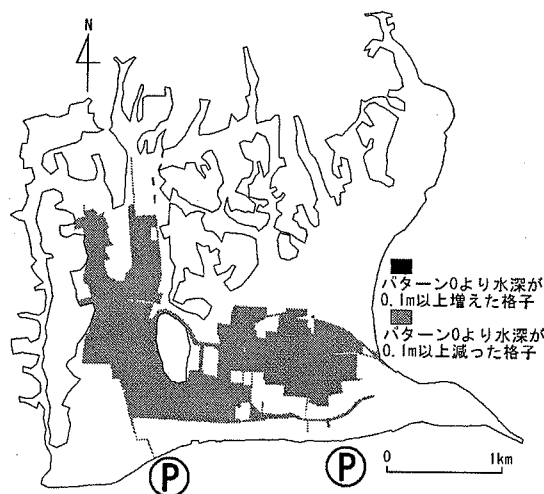


図-10 浸水深の軽減 (パターン4)

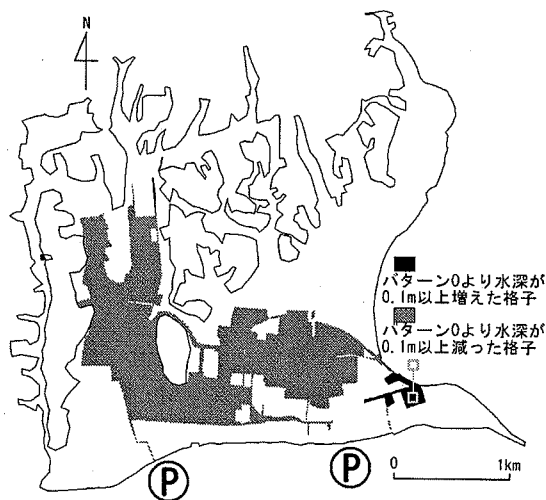


図-11 浸水深の軽減 (パターン7)

かる。さらに、パターン1と2、5と6を比較することによって、上迫子排水機場よりも、末次排水機場のほうが浸水抑制効果が大きいことがわかる。さらに、図-12に、排水能力を増強させる前後での大橋川の水位の変化を示す。図より、排水能力を増強させた排水機場からの排水は、大きなところでは大橋川の水位を約

表-2 浸水深0.1m以上の面積の増減量

パターン	0.1m以上の 浸水面積 [km ²]	パターン0からの 浸水面積増減量 [km ²]
0	3.62	—
1	3.12	- 0.50
2	3.14	- 0.48
3	3.84	+ 0.22
4	2.65	- 0.97
5	3.35	- 0.27
6	3.53	- 0.09
7	3.14	- 0.48

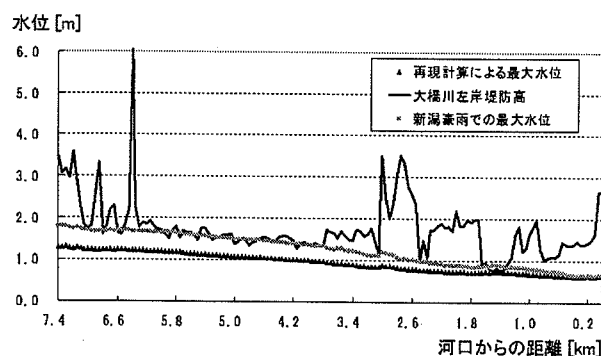


図-12 対策前後での河川水位の比較

0.6mも上昇させ、市街地付近でも堤防を越水する箇所が出てくるといふ結果が得られた。

よって、松江市低平地において最も効果的な排水対策は、水路網を用いて水位の低い朝酌川へできる限り排水し、さらに、末次排水機場の排水能力を重点的に増強させることであると考えられる。一方、水門の設置や既存の排水施設の排水能力を50m³/sまで増強させたとしても、松江市低平市街地部分7.83km²のうち約40%にわたり浸水被害が発生し、浸水を完全に抑制するまでにはいたらないという結果も得られた。

4. おわりに

本研究では、松江市街地の立地する低平地を対象として、松江市街地と隣接斜面、大橋川・朝酌川河川網、

朝酌川上流域からなる統合型の氾濫解析モデルを構築し、松江低平地の内水氾濫による浸水被害軽減策について検討した。その結果、松江低平地におけるもっとも有効な浸水被害軽減策は、水路網を使って雨水をすみやかに朝酌川に排水し、末次排水機場の排水能力を重点的に増強することであることがわかった。

今後の課題として、下水道管渠を導入した場合の浸水被害軽減効果を検討することが挙げられる。また、浸水深の差を用いた検討だけでなく、浸水深の時間変化や流速ベクトルなどの結果も詳細に分析しながら、いかに早く氾濫水を排水するかといった観点等からも浸水対策のあり方を検討するべきであると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、土木学会水工学委員会の河川懇談会より援助をいただいた。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 川池健司，井上和也，戸田圭一：非構造格子の都市氾濫解析への適用，水工学論文集，第44巻，pp.461-466，2000。
- 2) 立川康人，原口 明，椎葉充晴，高埴琢馬：流域地形の三角形要素網表現に基づく分布型降雨流出モデルの開発，土木学会論文集，No.565/II-39，pp.1-10，1997。
- 3) 井上和也，戸田圭一，前田 修：河川網が発達した領域での氾濫解析法とそのメコンデルタへの適用，水工学論文集，第44巻，pp.485-490，2000。
- 4) 高橋 保，井上素行，中川 一，里深好文：山岳流域における土砂流出の予測，水工学論文集，第44巻，pp.717-722，2000。
- 5) 中川 一：洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究，京都大学学位論文，1989。
- 6) 川池健司，井上和也，林 秀樹，戸田圭一：都市域の氾濫解析モデルの開発，土木学会論文集，No.698/II-58，pp.1-10，2002。
- 7) 市川 温，佐藤康弘，椎葉充晴，立川康人，宝 馨：山地流域における水・土砂動態モデルの構築，京都大学防災研究所年報，第42号 B-2，pp.211-224，1999。

(2006. 4. 6受付)