

短時間豪雨による都市域河川の危険度解析

ANALYSIS OF FLOOD HAZARD BY HEAVY RAINFALL OF SHORT TIME IN URBAN RIVER BASIN

徳永智宏¹・戸田圭一²・川池健司³・間島真嗣⁴

Tomohiro TOKUNAGA, Keiichi TODA, Kenji KAWAIKE and Shinji AIHATA

¹正会員 修(工) 建設技術研究所 九州支社(〒810-0041 福岡市博多区大名2-4-12)

²正会員 Ph. D. 京都大学防災研究所 教授(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 博(工) 長崎大学工学部 助手(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

⁴学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

A simulation analysis has been conducted to simulate the rapid change of river water depth and the consequent inundation in urban river basin by heavy rainfall of short time. The studied river basin is Ikawa River basin located in Uji City, Kyoto, Japan. The model applied here constitutes a runoff model based on the kinematic wave model and a 2-D horizontal inundation model with unstructured meshes. Small rivers and ditches are incorporated into the unstructured meshes. The 2-D inundation model is partially substituted for the runoff model where the application of kinematic wave model is difficult. The past inundation by heavy rainfall of short time was well simulated by this model. Also, considering the river water depth and its rate of change, the degree of flood hazard possibility is discussed.

Key Words : Urban flood, urban river basin, inundation analysis, heavy rainfall of short time

1. はじめに

1999年6月, 2003年7月の福岡水害や2000年9月の東海水害に見られるように, 豪雨による都市水害が顕在化してきている。また, これらほど大規模でなくても, 低平地都市流域を中心に, 全国いたるところで毎年のように内水氾濫(雨水を排除できずに生じる氾濫)が発生している。短時間ながら降雨強度が大きい雨によって内水氾濫が生じる場合がよくあるが, 氾濫には至らなくても, 都市域河川の流速や水深が急激に変化し, 思わぬ水難事故を招くような危険性もある。一方, このような都市域河川の洪水・氾濫解析は, 山地からの雨水流出, 河道の洪水流下, 河道からの氾濫が明確に区分できず, 大きな河川に比べてかえって扱いにくい面もある。

本論文では, 都市域河川の洪水・氾濫現象を, 領域が小さくても流域の視点からとらえ, 流出解析と氾濫解析を結合した統合型の流域モデルを用いた解析手法を京都府宇治市内の井川流域に適用した事例を紹介する。あわせて, 短時間豪雨時の河川の水深ならびにその変化量を基に, 都市域河川の危険度を評価する手法も紹介する。

2. 統合型流域モデル

「豪雨発生から水害の発生・拡がり」までの一連の流れを表現するには, 都市を含む河川流域を対象として, 流域からの降雨流出, 河道内での洪水の発生と流下, 河道からの溢水が生じた場合の氾濫現象を総合的に説明できるモデルを構築しなければならない。また都市中心部や低平地都市流域では, 下水道の雨水に及ぼす影響も十分考慮する必要がある。ただし, 流域の特性やそこで発生する水害事象によってモデルの枠組み(骨組み)も変わってくることに十分注意しなくてはならない。

例えば, 1999年, 2003年の福岡水害のような都市域河川の溢水による氾濫現象に対しては, (1) 河川流域からの流出解析モデル, (2) 河道の洪水解析モデル, (3) 河道からの溢水による氾濫解析モデルを直列的に統合し, さらに氾濫水の排水過程も考慮するならば, (4) 下水道解析モデルを付加すればよい。戸田らが以前に実施した豪雨による京都市内の洪水氾濫解析¹⁾は, 昭和10年の京都の水害を参考にシミュレーション解析したものであるが, モデルの枠組みは上に述べたものとほ

ぼ同じである。一方、低平地河川流域での内水氾濫事象は、流域内の雨水を堤外に吐き出せずに生じる氾濫であるため、(1) 流域内の降雨流出モデル、(2) 中小河川、下水道あるいはその両者による降雨排水モデル、(3) 排水しきれなかった雨水の氾濫解析モデルが結合したものとなる。(2) の下水道モデルでは、降雨の下水道への流入過程、下水道内の雨水の流下過程、地上の氾濫水と下水道内の水のやりとりなどをいかにモデル化するかが重要であるが、同時に対象領域を拡大したとき、どのようにモデルを実用的なものにするかも大切なポイントである。詳細なモデル解析としては大阪寝屋川流域を対象とした川池ら²⁾のものがある。

次に、統合型流域モデルの応用解析事例として、小流域の都市域河川の内水氾濫解析と、短時間豪雨時の都市域河川の流況解析を紹介する。

3. 宇治市井川の内水氾濫解析モデル

(1) 対象領域と解析モデル

対象領域は図-1(a)(b)に示す京都府宇治市内の井川流域であり、解析対象とした流域の面積は約11km²である。井川は上流部から流れ込む折居川、追手川を加えて西流し、途中、伊勢田川を加えて古川に合流するコンクリート張りの都市河川であり、川幅は10m~15m程度、一級基点から井川下流端までの区間距離は3km弱である。南側の山手から流出した雨水は井川に流れ込み、井川沿い、とくに左岸沿いで豪雨による溢水氾濫が頻発する状況である。井川の左岸域の下水道は分流式であり、雨水は側溝や用水路を経て井川に流入する。また右岸域では地盤が南東から北西に向かって緩やかであるが低くなっている。河川の代表地点の様子を写真-1に示す。

折居川、追手川（流域面積計約1.1km²）や伊勢田川（流域面積約1.3 km²）といった小河川流域の領域からの雨水流出に対しては、キネマティックウェーブ法による流出解析法³⁾を適用し、下流域に適用する氾濫解析の境界条件とする。その他の領域からの雨水流出は、降雨を横流入と見立て、非構造格子モデルによる平面二次元の氾濫解析を適用する。また井川および上記の小河川の一部も、地盤高が周囲よりも低い長方形の格子とみなして二次元格子の中にとりこむ。この工夫により、雨水の表面流出と河川の溢水による氾濫現象が同時に表現できる。

平面二次元の氾濫解析モデルの基礎式は以下の浅水流方程式である。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3)$$

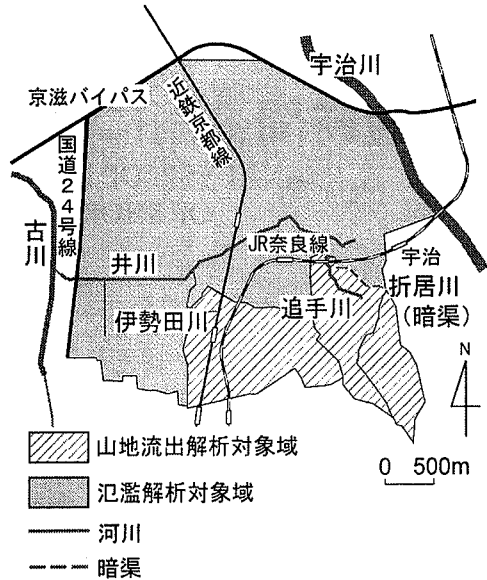


図-1(a) 井川流域

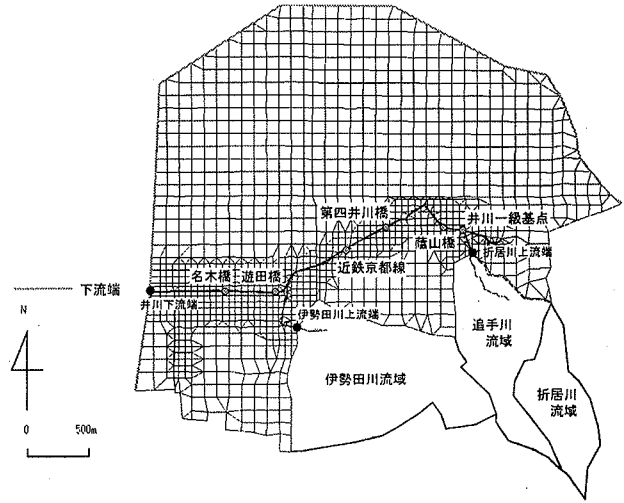
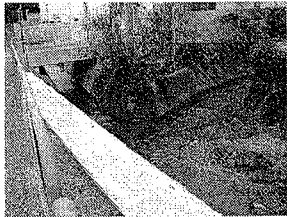


図-1(b) 解析対象領域と非構造格子



(a) 折居川(左)上流端(折居川との合流点)



(b) 遊田橋付近

写真-1 対象域の河川の平水時流況

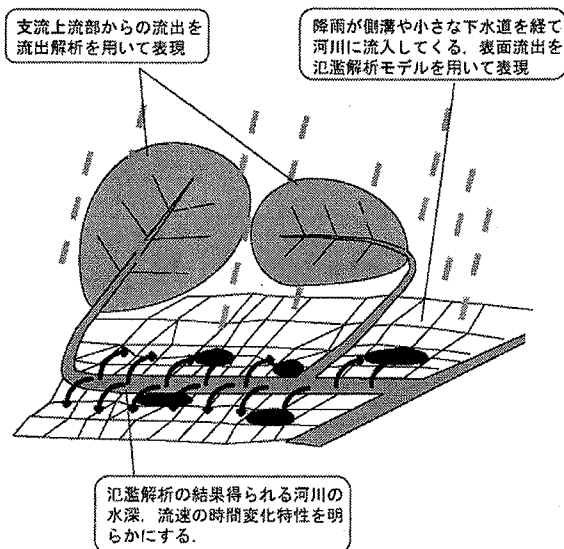


図-2 適用した統合型流域モデルの概念図

ここに h : 水深, u, v : それぞれ x, y 方向の流速, $M=uh$, $N=vh$: それぞれ x, y 方向の流量フラックス, H : 水位, r_e : 有効降雨強度, g : 重力加速度 n : マニングの粗度係数である。なお、非構造格子による解析の詳細は文献4)を参照されたい。

氾濫解析対象領域は、北は京滋バイパス、東は宇治川、西は国道24号線、南は名木川との流域界で囲まれた面積約8.2 km²の領域である。適用した統合型流域モデルの概念図を図-2に示す。

(2) 解析条件と解析結果

図-3に示す、1999年6月26日21時から27日10時に京都地方気象台で観測された短時間豪雨（総降雨量126mm、10分間の最大降雨量17mm）により遊田橋付近、近鉄京都線の横過地点付近、第四井川橋付近で井川からの溢水が起こった。また遊田橋の南西約500mの低地でも浸水が発生している。この降雨を与えて上記のモデルを用いて解析を行った。26日21時を計算開始時刻として0時とする。領域の境界では、解析格子として組み込んでいない無数の用水路、小河川が存在による排水効果を考慮して段落ち式で排水させた。井川の下流端境界条件も簡単のため

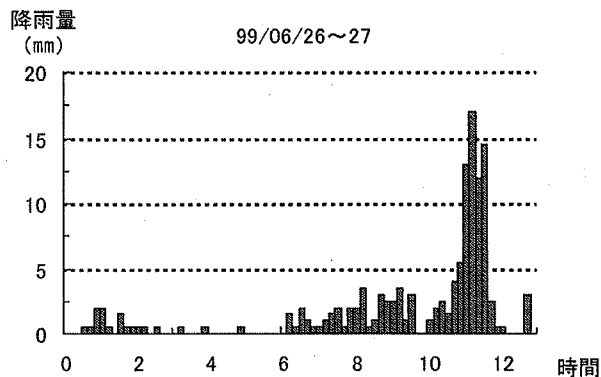


図-3 解析に用いた降雨

段落ち流れとした。氾濫解析の河川格子として処理している井川からの堤内地への溢水の取り扱い、川池ら⁴⁾の方法に倣って越流公式を適用した。また井川右岸域の下水道の雨水排除効果は不明なので、左岸域にのみ降雨を与えた。有効降雨に関しては、予備検討から飽和雨量を50mmとし、総雨量がそれ以下の段階の降雨に対しては流出率を0.85として有効降雨を算出した。流出解析の斜面の等価粗度は0.05（ただし公園部は0.2）、河道の粗度係数は0.025とした。氾濫解析の粗度係数は、河川格子では0.025、それ以外では0.067とした。氾濫解析の予備検討段階で、運動量式の移流項を含んだ場合と含まない場合の結果を比較したところ、ほとんど差異が認められなかった。よって、計算時間の短縮と数値不安定性の防止を考慮して、ここでは移流項を省略して計算を行った。なお初期条件は、流域が完全なドライな状態とした。

流出解析による折居川・追手川、伊勢田川の流出流量を図-4に示す。また計算で得られた最大浸水深分布を図-5、浸水実績箇所を図-6に示す。両図を比較すると、近鉄京都線の横過地点付近、遊田橋付近およびその南西のエリアなどの最大浸水深が大きく現れている箇所と浸水実績箇所とはおおむね一致している。また図-7は計算で現れた井川の各地点の最大水位（必ずしも同時刻のものではない）を縦断的に連ねた図である。図中の上下

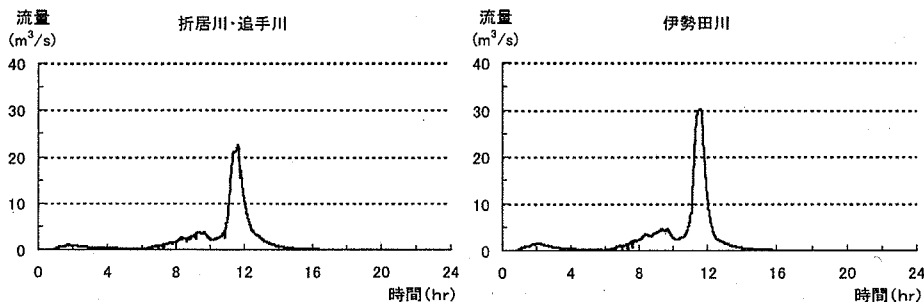


図-4 支川からの流出流量

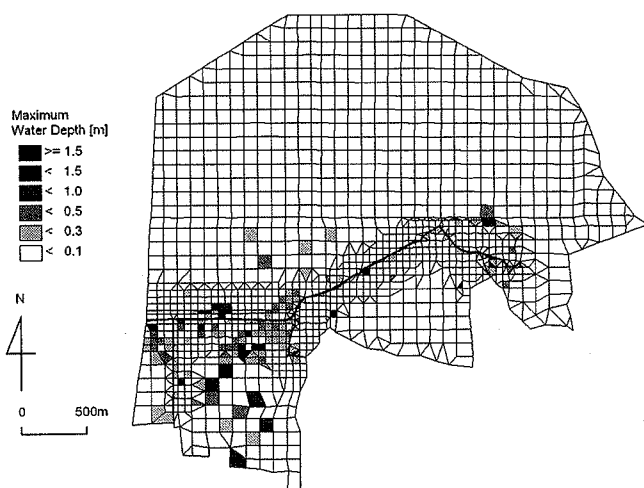


図-5 計算による最大浸水深の分布

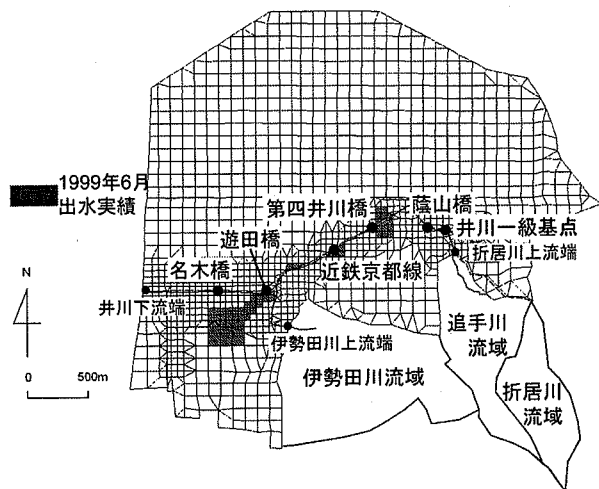


図-6 浸水実績箇所

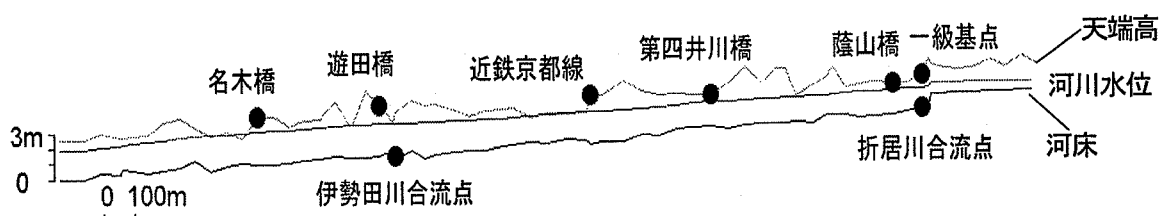


図-7 井川の最大水位の縦断面図

の線は、それぞれ堤防高（左右岸の低い方）と河床高である。計算での河川からの溢水地点（水位が堤防高を上回っている地点）は浸水が報告された箇所とほぼ対応している。以上の結果より、このような解析モデルで短時間豪雨による浸水の恐れをある程度把握することは可能と言えよう。

なお、ここでは井川の下流端では段落ち流れとし、井川が流入する古川の水位は井川に影響を及ぼさないとしたが、総降雨量が増大した場合は、古川の水位上昇の影響が現れてくるので、井川からの溢水はその程度を増すことが懸念されよう。

4. 短時間豪雨による井川の危険性

図-8は1999年6月26～27日の降雨条件下での井川の各地点での水深と流速の時間変化を示したものである。河川の初期状態はドライとして扱っているが、集中豪雨時の水深の変化が顕著であり、とくに名木橋、遊田橋、近鉄京都線横過地点では水深が2mに達している。また計算開始約11時間後からの1時間で水深が1m以上急激に増加していることがわかる。この時間帯では河川沿いにいる

市民が思わぬ水難事故に遭う可能性が十分考えられる。一方、流速は急激に上昇している時間帯も存在するが、全体的にその値は低い傾向にあることがわかる。

対象とした河川の短時間豪雨による危険性をさらに検討するために、文献5)に準じて、降雨継続時間30分、総降雨量30mmの矩形波のモデル降雨を流域に一樣に与え、最大流速が2m/s、あるいは最大水深が1mを上回るかを第一段階の指標、流速、水深のどちらかの10分間の最大変化量が、1.0m/s、0.5mを上回るかを第二段階の指標として井川の代表地点のランク分けを試みた。10分という時間は、人間が危険を察知して川べりから退避するのに要する時間のオーダーと考えた。短時間豪雨時による出水時の危険度を3段階で表し、危険度が高い順にAA、A、Bと記している。選定のフローを図-9に示している。

ランク分けした結果を流域図に重ね合わせて示したものが図-10である。図-8と同様、名木橋、遊田橋、近鉄京都線横過地点が危険であることがあらためて確認された結果となっている。「短時間豪雨時の都市域河川危険度マップ」の試案のようなものであるが、このような方法で短時間豪雨時における流域内の河川流況の変化や危険性を、荒削りながらも定量的に表現することも可能であろう。

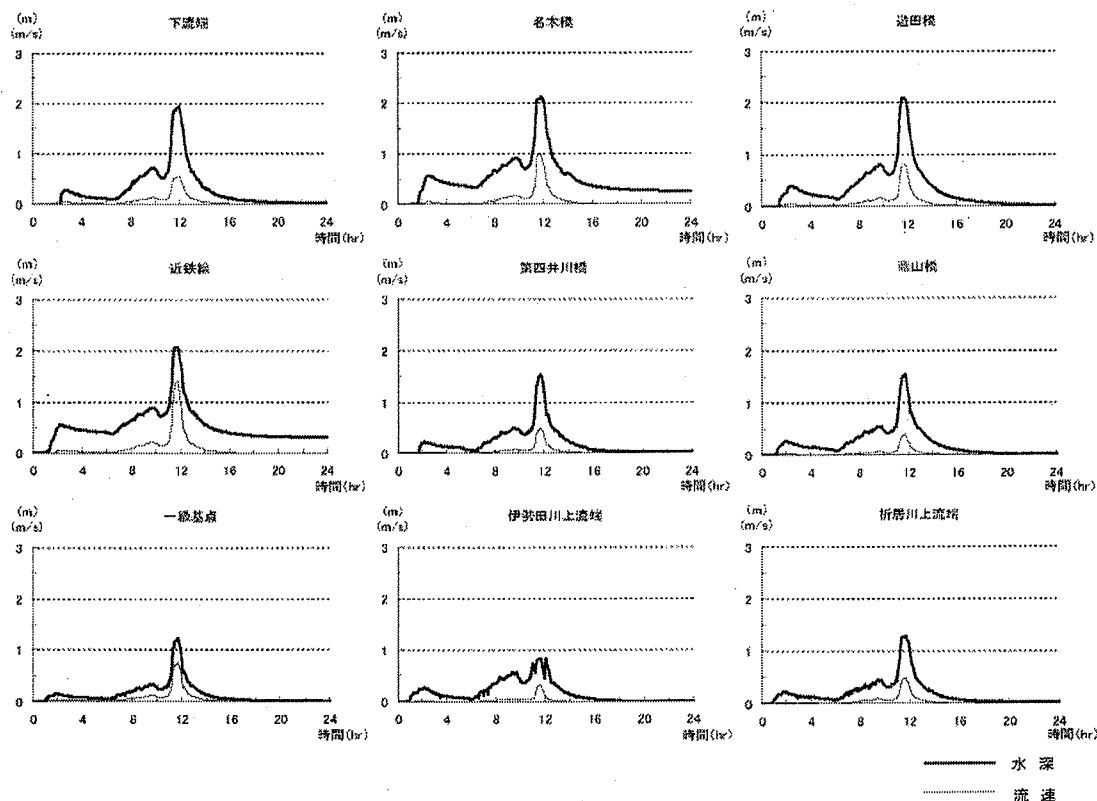


図-8 井川内の流速・水位の時間変化

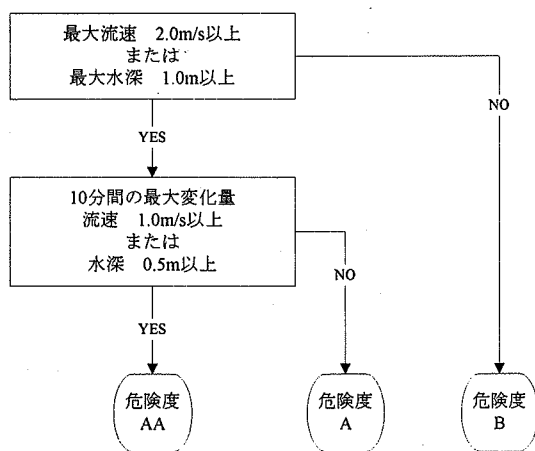


図-9 危険度ランク選定フローチャート

5. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 京都府宇治市を流れる井川およびその流域（およそ11km²）を対象として、キネマティックウェーブ法に基づく流出解析モデルと非構造格子を用いた平面二次元氾濫解析モデルを結合した都市域河川の洪水・氾濫解析モデルを構築した。河川からの溢水氾濫が生じた1999年6月の降雨を与えて解析したところ、浸水箇所が概ね一致する結果が得られた。

(2) 単純な短時間モデル降雨を与えて河川内の複数地点で最大水深、最大流速、水深・流速の増加率を求め、その結果を基に水難事故発生危険性を検討した。完全にドライの状態から降雨継続時間30分、総降雨量30mmの降雨を与えたところ、下流の3地点では、最大水深が1mを越え、かつ10分間の水深の変化量が0.5mを上回り、危険な状態になることが知られた。

最近では、わが国の都市域の雨水流出・洪水氾濫現象の解析に、欧米で開発された汎用的なモデルも適用されてきている。この場合でも、基本的には統合型流域モデルのコンセプトの下に解析が行われている。

都市水害は、その都市が位置する流域の特性に大きく支配される。その面からも、様々な都市域河川の流域で、都市水害現象の予測のための解析が鋭意進められて、その情報を皆が共有することが今後ますます重要となると考えている。

謝辞：本研究を進めるにあたりご尽力いただいた京都大学防災研究所教授林春男先生、統合型流域モデルに関して種々ご教示いただいた京都大学名誉教授井上和也先生に深甚の謝意を表します。また本研究の一部は、科学研究費補助金、基盤研究(C) (2) (代表：戸田圭一、課題番号16510113) の援助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

1) 戸田圭一・井上和也・村瀬 賢・市川 温・横尾英男：豪

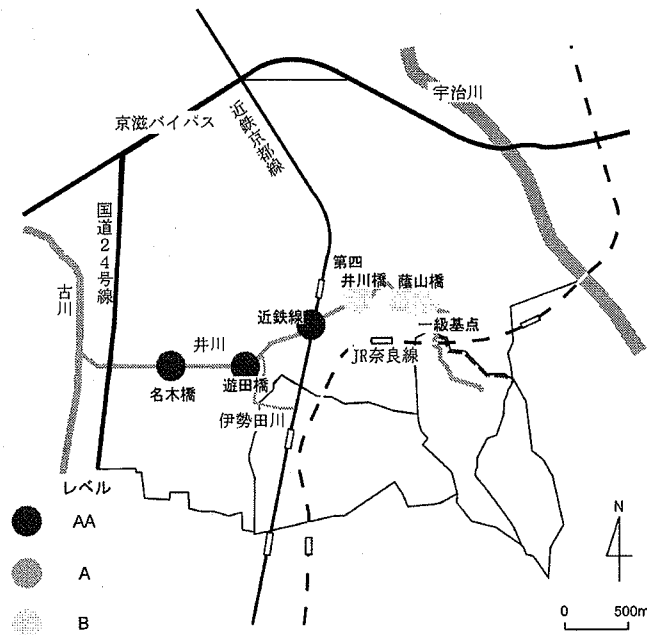


図-10 短時間豪雨時の井川の危険度マップ

雨による都市域の洪水氾濫解析，土木学会論文集，No. 663/II-53， pp. 1-10, 2000.

2) 川池健司・井上和也・戸田圭一・野口正人：低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析，土木学会論文集，No. 761/II-67， pp. 57-68, 2004.

3) 高橋保・井上素行・中川一・里深好文：山岳地域における土

砂流出の予測，水工学論文集，第44巻， pp. 717-722, 2000.

4) 川池健司・井上和也・戸田圭一：非構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.

5) 戸田圭一・徳永智宏・井上和也：親水河川の出水時の危険度解析，自然災害科学，22-3， pp. 285-297, 2003.

(2005. 4. 7 受付)