

豪雨時の河川親水域の危険度解析

STUDY ON FLOOD HAZARD IN RIVER RECREATION SITE DUE TO HEAVY RAINFALL

戸田圭一¹・井上和也²・徳永智宏³・川池健司⁴

Keiichi TODA, Kazuya INOUE, Tomohiro TOKUNAGA and Kenji KAWAIKE

¹正会員 Ph.D. 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)
²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)
³学生員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
⁴学生員 修(工) 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 mathematical model which can simulate inundation process in river recreation site due to heavy rainfall has been developed. This model comprises the runoff model by the kinematic wave method and the 2-D inundation flow model based on the generalized curvilinear coordinate system. This model was applied to Hiragino park area in the Kamo river basin, Kyoto city. It was found out that under the same rainfall condition that caused the flood disaster at Tanigawadake in August 2000, the park area can become very dangerous. Also, the flood hazard possibility is expressed by the rainfall intensity and the time taken for rise of water depth or river velocity.

Key Words : river recreation site, runoff analysis, inundation flow analysis, heavy rainfall, hazard prediction

1. はじめに

わが国では、近年のアウトドア志向の高まりにより、自然体験型のレジャーを楽しむ人々が増加している。そのなかで、親水空間としての河川への関心も高まっており、キャンプやバーベキューを河川敷およびその周辺で楽しむ人々を多く目にする。ところが河川で楽しむ人が増える一方で、河川での水難事故も跡を絶たない。例えば1999年8月に神奈川県山北町の玄倉川において、キャンパーが増水した河川の中州に取り残され流された事故や、2000年8月の群馬県水上町谷川岳湯檜曾川での、鉄砲水によるハイカーの水難事故は記憶に新しい。これらの事故で悔やまれることは、事故に遭った人々が河川に対する正しい知識を持ち合わせ危険を認識していれば、あるいは事故は防げたかもしれない、という点である。

このような状況の下、河川管理者や河川に深く関わる人々が、河川の危険性を喚起し、河川利用時の注意を呼びかけている。1999年の玄倉川の事故の後には、土木学会水理委員会から河川の危険性を紹介する記事¹⁾が配布され、2000年2月には建設省(現国土交通省)河川局内に「危険が内在する河川の自然性を踏まえた河川利用及び安全確保のあり方に関する研究会」が設けられ、10月には「怖さを知って川と親しむために」²⁾という提言が答申された。提言に述べられてい

るように水難事故防止活動として様々なものが考えられる。その中でも、小さな子供も含めた一般市民に河川ならびに河川親水域の危険性を訴えるには、「人気の水辺空間」が「どのような降雨で」「どのような状態」になり得るかを定量的に示すことがきわめて重要でかつ効果的であると考えられる。本研究は河川親水域の豪雨時危険度評価の基礎的な技術手法を示したものである。またその手法を京都市賀茂川流域の柊野公園周辺に適用した結果もあわせて示している。

2. 解析手法

(1) 概説

河川親水域での水難事故に結びつく危険な状況の一つは、上流の山地域の降雨により急激に河川の水かさが増大し、短時間のうちに中州や河川敷およびその周辺が浸水したり、河川内の水流が速くなる場合である。流木や土砂により造られた天然ダムの決壊や雪崩などが発生すれば、降雨による場合よりも一層危険な状況が生じることも予想されるが、本研究のねらいは、私たちの身近な水辺に潜む危険性の程度を明らかにすることにあるので、外力としては降雨、しかも短時間の降雨を取り扱うこととする。

豪雨に対して河川親水域がどのようになるか、すなわち親水域内での水位、流速の時空間分布がどう変化

するかを見るには、親水域を含む河川周辺の平面二次元氾濫解析手法が適用できる。また豪雨による出水を扱うわけであるから、氾濫解析の上流端境界条件にあたる流出流量ハイドログラフが必要となるが、これを求めるには対象域背後の上流山地部を対象とした流出解析を行えばよい。すなわち山地部の流出解析と親水域の平面二次元氾濫解析を組み合わせることにより河川親水域の危険度評価解析が可能となる。

流出解析、氾濫解析とも様々なモデルが提案されているが、解析に用いるモデルにとりたてて制約はない。ただし氾濫解析の対象となる河川親水域は、通常の氾濫解析の対象域と比較して狭小であり、中州や水際形状など河川親水域内の微地形を詳しく取り込めるよう工夫する必要がある。本研究では、流出解析法として、従来から広く用いられている kinematic wave 法を、氾濫解析法として、一般曲線座標に基づく平面二次元氾濫解析法をそれぞれ適用した。全体のモデルの概念図を図-1に示す。

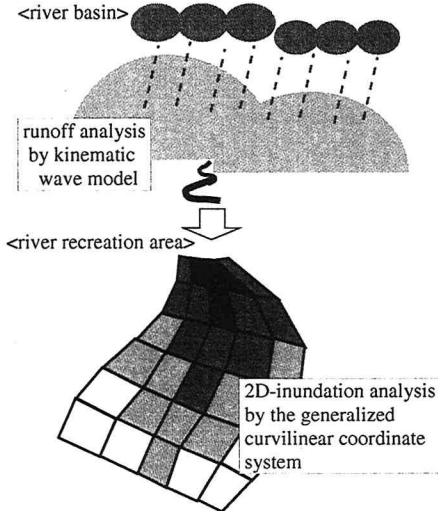


図-1 モデル概念図

(2) 山地部の流出解析

山地部の雨水流出は、斜面上の雨水流（斜面流）とそれらを集めて流下する河道の流れ（河道流）から成り立つものと考えられる。本研究では kinematic wave 法を用いるが、その基礎式は以下のとおりである。

<斜面流>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_*}{\partial x} = r_e \quad (1)$$

$$q_* = \alpha h^m \quad (2)$$

ここに、 h は水深、 q_* は斜面の単位幅流量、 r_e は有効降雨（ $r_e = f \cdot r$ 、 f は流出率、 r は降雨）、 α, m は定数であり、斜面こう配 θ_s と Manning 則の式形を用いると、 $m=5/3$ 、 $\alpha = \sqrt{\sin \theta_s} / N$ 、 N は等価粗度である。

<河道流>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{q_s}{B} \quad (3)$$

$$q = \alpha h^m \quad (4)$$

ここに、 q は河道の単位幅流量、 q_s は斜面からの単位長さあたりの横流入流量、 B は河道幅である。また河床こう配を θ とし、Manning 則を用いると、 $m=5/3$ 、 $\alpha = \sqrt{\sin \theta} / n$ 、 n は Manning の粗度係数である。解法は、斜面流については特性曲線法により河道への横流入流量を計算し、河道流については、Leap-frog法に基づく差分法で流出流量を算出した。なおここでは初期損失は考慮していない。

(3) 親水域の氾濫解析

平面二次元の氾濫解析の基礎式である浅水方程式をデカルト座標系で表現すると以下ようになる。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M^x}{\partial x} + \frac{\partial M^y}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

<運動量式>

(x 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial M^x}{\partial t} + \frac{\partial (u^x M^x)}{\partial x} + \frac{\partial (u^y M^x)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u^x \sqrt{(u^x)^2 + (u^y)^2}}{h^{1/3}} \end{aligned} \quad (6)$$

(y 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial M^y}{\partial t} + \frac{\partial (u^x M^y)}{\partial x} + \frac{\partial (u^y M^y)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 u^y \sqrt{(u^x)^2 + (u^y)^2}}{h^{1/3}} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 t は時間、 x, y はデカルト座標系の座標、 h は水深、 u^x, u^y は x, y 方向の流速、 M^x, M^y は x, y 方向の流量フラックス（ $M^x = u^x h$ 、 $M^y = u^y h$ ）、 H は水位、 g は重力加速度、 n は Manning の粗度係数である。

本研究では、河岸線を基準に座標軸を設定できる一般曲線座標を用いる。一般曲線座標系の基礎式は、デカルト座標系の基礎方程式を物理平面（ x, y ）系から計算平面（ ξ, η ）系に変換することにより以下のように導かれる。

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + J \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{M^\xi}{J} \right) + J \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{M^\eta}{J} \right) = 0 \quad (8)$$

<運動量式>

(ξ 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial M^\xi}{\partial t} = & -J^2 y_\eta \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^x}{J} \right) \right\} \\ & + J^2 x_\eta \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^y}{J} \right) \right\} \\ & - J^2 gh \left\{ (x_\eta^2 + y_\eta^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} \right. \\ & \quad \left. - (x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right\} \\ & - \frac{gn^2 M^\xi \sqrt{(M^x)^2 + (M^y)^2}}{h^{7/3}} \end{aligned} \quad (9)$$

(η 方向)

$$\begin{aligned} \frac{\partial M^\eta}{\partial t} = & J^2 y_\xi \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^x}{J} \right) \right\} \\ & - J^2 x_\xi \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi M^y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta M^y}{J} \right) \right\} \\ & - J^2 g h \left\{ -(x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta) \frac{\partial H}{\partial \xi} \right. \\ & \quad \left. + (x_\xi^2 + y_\xi^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right\} \\ & - \frac{g n^2 M^\eta \sqrt{(M^x)^2 + (M^y)^2}}{h^{7/3}} \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 J はヤコビアンであり、以下のように定義される。

$$J = \frac{1}{x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi} \quad (11)$$

なお、 ξ, η の上付き添字はベクトル量の方向を、 ξ, η の下付き添字は、それらの変数による偏微分を表す。実際の計算においては、河川の流量が増加するにつれて水の存在しない領域に氾濫水が浸入していく現象を取り扱うことになり、氾濫水の先端の処理が問題になるが、その扱いは井上³⁾の方法に準拠することとする。

3. 賀茂川柵野公園周辺部への適用

(1) 対象領域

対象とした河川親水域は京都市北区の賀茂川柵野堰堤直上流部の柵野公園周辺部で、山地部の流出解析の対象域は公園より上流の賀茂川全流域である（図-2参照）。賀茂川の流域はいくつかの小さな谷が入り組んだ複雑な地形をなしているが、それらの谷のちょうど出口に柵野堰堤が位置する。

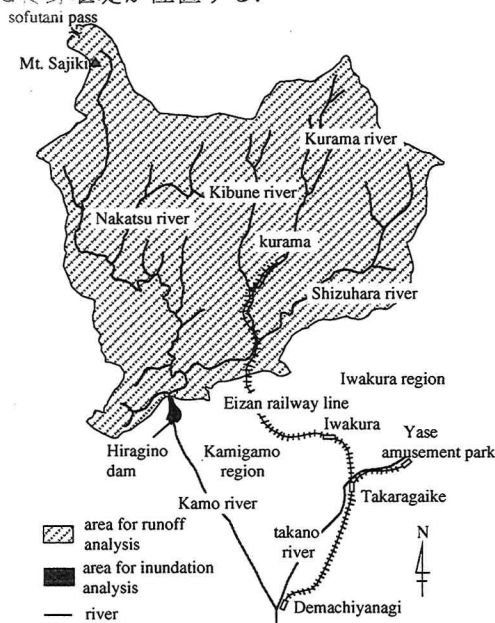


図-2 賀茂川流域

図-2に示した山地領域の流出解析を行うにあたって図-3に示すような斜面と河道に分割した。斜面の総数

は104個、河道断面の総数は3084個である。対象域の面積は約63.9km²である。

柵野公園は柵野堰堤の直上流左岸に位置する公園でグラウンドなどが整備されている。また対岸の右岸側は、写真-1に示すように親水性が高い河川敷の空間が広がっている。ここを解析の対象としたのは、

1. 市街地からそれほど離れていない水辺空間であり、多くの人々が集まる場所であること、
2. 公園の下流に柵野堰堤があり、氾濫解析の下流端の境界条件の設定が容易であること、

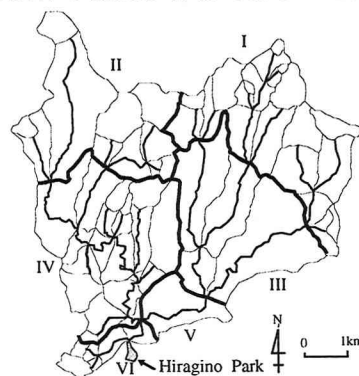


図-3 流域分割図

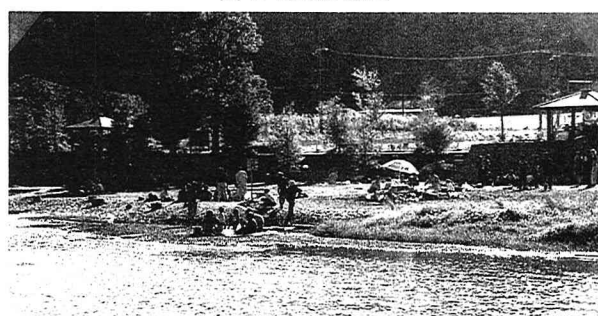


写真-1 右岸側の親水域

の理由による。対象域は図-4に示すような、賀茂川の山地からの出口を上流端とし、下流端は柵野堰堤、左右岸は河川敷よりも十分地盤の高くなった道路または

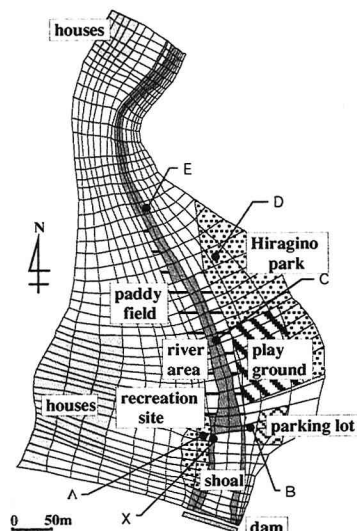


図-4 柵野公園周辺部の概要

水田を境界とした領域であり、その面積は約0.14km²である。図-4には氾濫解析に用いた解析格子もあわせて示す。解析格子数はξ方向に16個、η方向に50個である。また対象領域の地盤高を図-5に示す。

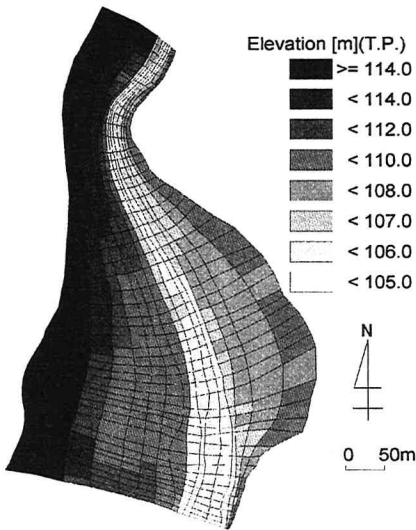


図-5 公園周辺の地盤高

(2) 計算条件

流出解析の計算条件は以下のとおりである。有効降雨を求めるための流出率 f は過去の出水解析結果⁴⁾を参考に $f=0.7$ とした。河道断面の間隔は $\Delta x=20\text{m}$ 、計算時間ステップは $\Delta t=0.5\text{s}$ 、河道の粗度係数は $n=0.02$ を用いた。なお等価粗度 N の値については後述する。

氾濫解析では、河川にはじめ流れが存在しないものとした。上流端境界条件として、流出解析で得られる流量ハイドログラフを与えた。ただしその流量は断面全体の流量であるため、氾濫解析の格子には地盤の低い格子から順に流量を分割して与えた。下流端では、堰堤高7mの終野堰堤の存在を考慮して段落ち式を用いて氾濫水を流下させた。氾濫域のManningの粗度係数は $n=0.03$ 、計算時間ステップは $\Delta t=0.01\text{s}$ とした。

(3) 1999年6月の降雨条件での解析（ N の決定）

1999年6月26日～27日にかけて上賀茂水位雨量観測所で観測された降雨条件で終野公園周辺部の解析を行った。この降雨の最大時間雨量は35mm/hr、総雨量は106mmである。流出解析では対象領域全域に一樣にこの降雨を与えた。

流出解析の等価粗度により流量ハイドログラフは変化し、その結果、氾濫解析結果も変化する。等価粗度の値を決定するにあたり、流出解析の下流端での流量観測値は存在しなかった。そこで今回は、出水時に京都府京都市土木事務所が撮影した公園周辺部内の浸水状況写真と等価粗度を種々変化させた解析結果のうち最大浸水深分布を比較することにより、等価粗度を決定する方法をとった。公園内のグラウンドは最も浸水が激しい時にはほぼ全域で10cm～30cmの浸水が見られた。この状況を再現する解析結果を与える N が0.8であった

こと（図-6）より、以降の解析では $N=0.8$ を用いた。

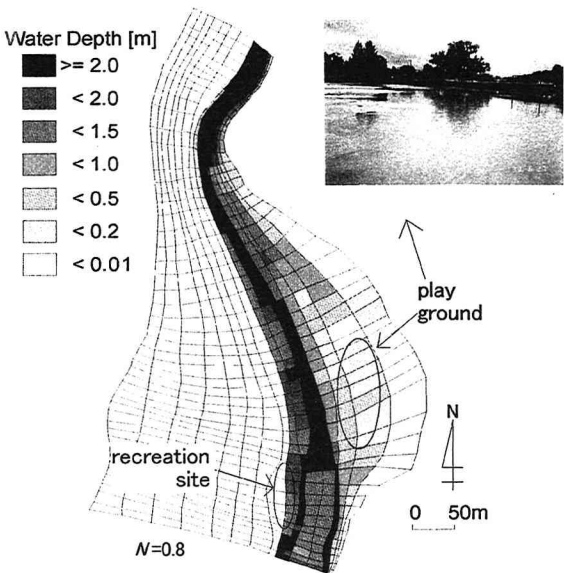


図-6 最大浸水深分布

(4) 2000年8月の谷川岳の降雨条件での解析

2000年8月群馬県谷川岳湯檜曽川で鉄砲水が発生し、川づたいにハイキングをしているグループの一人が亡くなる水難事故が発生した。小葉竹・清水⁵⁾の報告によれば、事故現場においては事故の前兆となるような降雨はほとんど無かったが、上流域では短時間に局所的な豪雨が観測されていた。事故現場周辺のレーダー雨量計メッシュ区分図、各レーダー雨量計の観測降雨を図-7、図-8に示す。なお図-8では、2000年8月6日13:40の時刻を0時と書き換えている。

この降雨分布を賀茂川流域に与え、終野公園周辺部の危険度を検討してみた。賀茂川流域を図-3に示す6領域に分割し、それぞれの領域に図-8の降雨を与えた。なお終野公園周辺部は、VIの領域に含まれるとした。得られた流量ハイドログラフを図-9、計算開始52分後から5分ごとの浸水深分布の時間変化を図-10に示す。図-10より、公園周辺部では短時間のうちに浸水が進む様子が窺える。図-11は、図-4に示す対象領域内の代表的な格子を選び、その格子内地点での水深、あるいは浸水深の時間変化を示したものである。ここに各地点は、

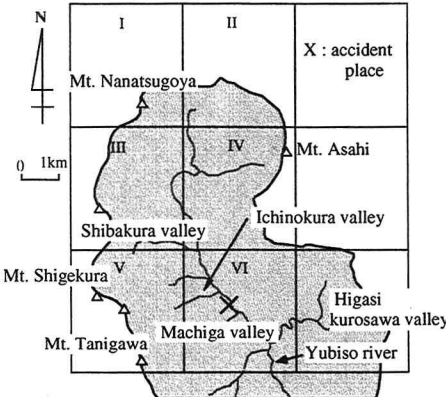


図-7 レーダー雨量計メッシュ区分図

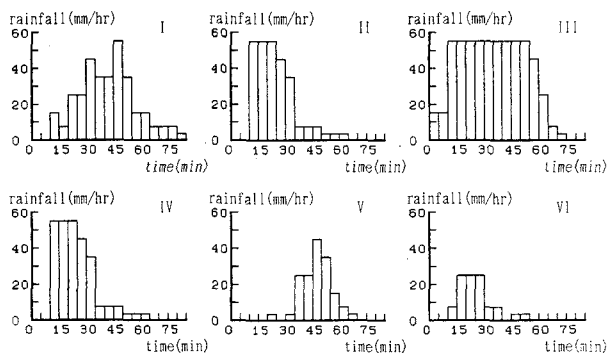


図-8 各区分域での観測降雨

A：右岸の親水性を有する河川敷内

B：左岸の駐車場内 C：河道内

D：左岸の公園内 E：左岸の側岸部

に位置する。河道内のC点および河道に近いA点、E点では短時間で水深あるいは浸水深が急激に上昇することがわかる。そのなかで市民がピクニックなどで利用するA点に着目してみると、浸水深が変化し始めてからわずか5分程度で水深は50cmを超え、約20分後には1mにも達する。図-12はA点の前面に位置する河道内のX点（図-4参照）での流速の時間変化であるが、流速はほんの数分のうちに約1.5m/sに達している。

今回の降雨条件は、流域分割領域のVIに属する公園の周辺部では、20mm/hr以上の強度の降雨は出水がはじまる以前に約15分間しか続かず、その後はさほど強い雨とは認識されない程度である。しかも河川の出水

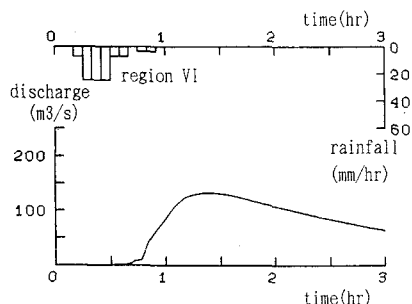


図-9 流量ハイドログラフ

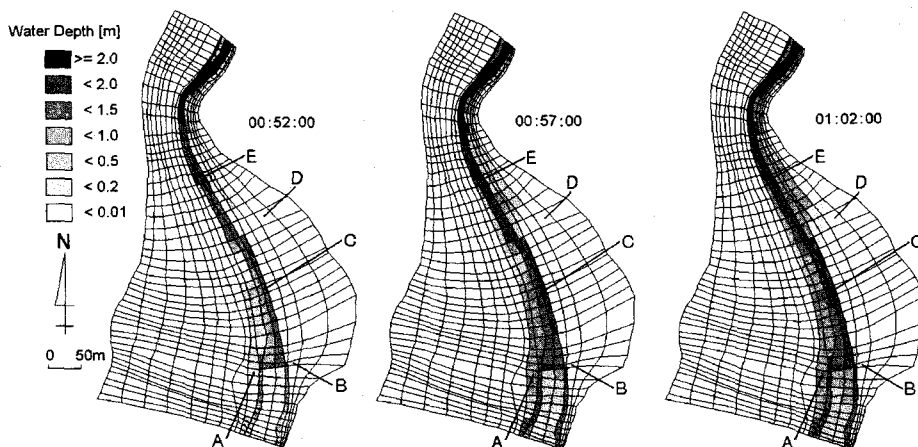


図-10 浸水深分布の時間変化

は公園部周辺の降雨が一度止み、再び降り始めた頃に発生している。そのため、この状況下では利用者はそのままA点付近に留まっている可能性は高く、例えば保護者がすこし目を離れた際に小さな子供が思わぬ水難事故に遭うようなことは十分あり得る。

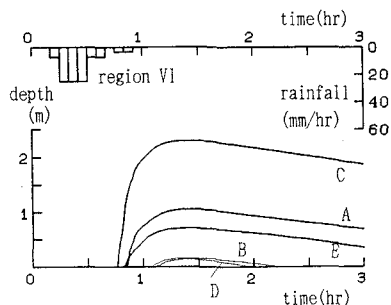


図-11 浸水深の時間変化

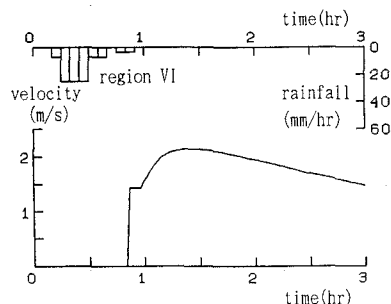


図-12 X地点の流速の時間変化

4. 親水域の危険度表示

モデル化した降雨を考え、降雨強度の変化により終野公園周辺部の代表地点の浸水深や流速がどのように時間変化するかを整理することにより、親水域の危険性を分かりやすく表現することを試みた。

(1) モデル降雨による流出解析

予備検討として、前方集中型、中央集中型、後方集中型の降雨分布をとりあげ、降雨強度や降雨継続時間を変えて流出解析を実施したところ、流量ハイドログラフのピーク出現時刻が最も早く、かつ立ち上がり

最もシャープになるのは前方集中型の降雨によるものであった。危険度評価の解析には親水域の流況が急激に変化する降雨条件が適していることから、モデル降雨として前方集中型の降雨を選定することとした。

図-13に示すように、はじめの20分間の降雨強度 R_{max} を10mm~60mm/hrとして、その後はそれに0.4, 0.2をかけたものが20分ずつ継続する降雨を用いた。また図-3の賀茂川流域をI~IIIの上流域とIV~VIの下流域に分割し、上流域では下流域よりも20分早く降雨が起こるとした。

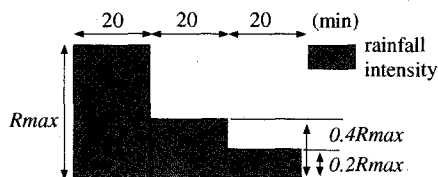


図-13 モデル降雨

(2) 親水域の危険度表示法

A地点およびその前方の河道内のX地点に着目し、A点の水深の上昇に要する時間と R_{max} の関係、X地点の流速の増加に要する時間と R_{max} の関係を表したものが図-14、図-15である。図は横軸に R_{max} を、縦軸に浸水が始まってから、あるいは流速が現れ始めてからの時間 t_s をとり、ある水深 h または流速 v にいたるまでの R_{max} と t_s の関係を表している。これらの図より、「ピーク降雨強度がどの程度であれば、何分後に浸水深あるいは流速がどの程度まで上昇するか」を簡単に読みとることができる。図から、 R_{max} が30mm/hr程度であれば t_s が10分ほどで浸水深は0.5mに達し、また t_s がわずか2,3分で流速は1m/sを超えることがわかる。実際の降雨流出現象はここでモデル化したほど単純ではないが、このような方法により短時間の豪雨による親水域の危険性のある程度表現することができよう。

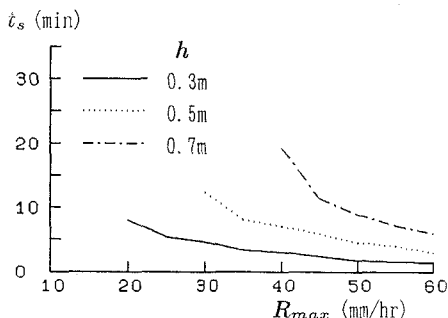


図-14 A点の浸水深による危険度表示

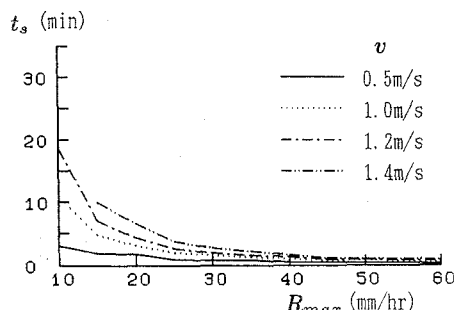


図-15 X点の流速による危険度表示

5. おわりに

河川親水域の豪雨時の危険度を解析した。得られた知見を要約すれば以下のとおりである。

1. kinematic wave モデルによる流出解析と一般曲線座標を用いた平面二次元の氾濫解析との結合により、豪雨時の河川親水域の流況を表現できた。
2. 京都市北区の賀茂川流域の終野公園周辺部を対象とし、2000年8月の谷川岳水難事故時の降雨条件を与えて解析したところ、対象域においても十分危険な状況になり得ることが知られた。
3. 短時間豪雨時の浸水深、流速の急増による河川親水域の危険度を降雨強度との関係で表現する方法が提示できた。

謝辞：本研究の実施に際し御協力いただいた京都府京都土木事務所の関係者の方々に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会水理委員会：キャンパーの水難事故についてー河川でのアウトドアライフを楽しむためにー、(社)土木学会水理委員会資料、1999。
- 2) 危険が内在する河川の自然性を踏まえた河川利用及び安全確保のあり方に関する研究会：恐さを知って川と親しむために、建設省河川局河川環境課資料、2000。
- 3) 井上和也・戸田圭一・林秀樹・川池健司・坂井広正：市街地における氾濫解析モデルの考察、京都大学防災研究所年報第41号B-2, pp.299-311, 1998。
- 4) 京都府：鴨川改修計画書, pp.26-29, 1976。
- 5) 小葉竹重機・清水義彦：谷川岳の鉄砲水について、土木学会誌 Vol.86,1, pp.71-74, 2001。

(2001. 10. 1受付)