

堤防決壊による洪水危険度の評価に関する研究

高橋 保・中川 一・西崎 丈能

TWO DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION METHOD TO ESTIMATE THE RISK OF A FLOOD HAZARD CAUSED BY A RIVER BANK BREACH

By *Tamotsu* TAKAHASHI, *Hajime* NAKAGAWA
and *Takeyoshi* NISHIZAKI

Synopsis

In Japan, about 50% of its population is living and 70% of properties are existing in flood hazardous zones. Although continuous efforts have been devoted to construct the structures to prevent from flooding, the risks to suffer from the hazard caused by river bank breach are still very high or even more than before due to progress of concentration of population and properties in the hazardous zones. In this circumstances, the soft measures to mitigate the disaster are very important. Among the various soft measures which are the generic term of the non-structural means, the prediction of the flood areas and their scales, such as the ranges of houses to be swept away, severely inundated, severely affected by the sedimentation etc. would be the most important because it gives us a correct understanding of the present state of safety of life and properties which is the starting point to construct the strategy against the hazard.

In this study, we propose a numerical simulation method of the floodings, in which the effects of existence of houses to the flow behavior are taken account. In addition, the criterion which determines whether the wooden houses will be swept away is discussed. We predict the flood hazardous zones in an actual basin by combining the simulation method with this criterion.

1. 緒 言

わが国では人口の約50%, 資産の約70%が洪水氾濫原に集中していると言われている。このような人口・資産の集中, 土地利用の高度化等の社会変化によって, 従来からの連続堤の整備や洪水調節用ダムの建設, 遊水池の設置等のハードな治水対策のみならず, たとえ氾濫しても被害を最小限にとどめるために, 建築物の耐水化や土地開発の規制, 予警報・避難システムの確立, 洪水保険といったいわゆるソフトな対策を確立していくことも重要視されるようになってきた。ソフトな対策の一環として, 洪水氾濫による木造家屋の流失・全壊および冠水等の危険範囲とその規模を予め知っておくことは, 今後の適切な土地開発の方向や現状を認識しておく意味においても重要となろう。

本報では, まず, 洪水氾濫に関する基礎方程式を誘導し, 数値計算を実行するためにその差分式を示すとともに, 家屋群が存在する場での氾濫計算手法と家屋の流失危険度の判定を結合した解析法を提示する。さらに, これを実流域に適用して, 冠水範囲とその規模および木造家屋の流失危険範囲の予測を行って, 流域の洪水災害危険度を評価する。

2. 基礎方程式

2.1 基礎方程式の誘導

xy 平面を水平面にとり鉛直上方に z 軸をとると、水平粘性を無視し、鉛直方向に関して重力と圧力項が卓越すると考えれば、流体運動を表わす運動方程式および連続式は次の各式で表わせる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 u, v, w ; それぞれ x, y, z 方向の流速成分、 p ; 圧力、 ρ ; 流体の密度、 ν ; 動粘性係数、 g ; 重力加速度である。(4)式を **Fig. 1** の記号を用いて地面 $z=\eta_b$ から自由水面 $z=\eta$ まで z 軸方向に積分すると

$$\begin{aligned} \int_{\eta_b}^{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz &= \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta_b}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial x} \Big|_{z=\eta} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \Big|_{z=\eta_b} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \int_{\eta_b}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial y} \Big|_{z=\eta} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \Big|_{z=\eta_b} + w \Big|_{z=\eta} - w \Big|_{z=\eta_b} \quad \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

η は t, x および y の関数だから

$$d\eta = \frac{\partial \eta}{\partial t} dt + \frac{\partial \eta}{\partial x} dx + \frac{\partial \eta}{\partial y} dy \quad \dots\dots\dots(6)$$

したがって

$$w = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{dy}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad \dots\dots\dots(7)$$

底面での境界条件から、 $u \partial \eta / \partial x|_{z=\eta_b}=0, v \partial \eta / \partial y|_{z=\eta_b}=0, w|_{z=\eta_b}=0$ となる。流速 u, v について、それらを断面平均流速 u_0, v_0 とそれからの変動量 u', v' に分け、 $u_0(\eta - \eta_b) = u_0 h = \int_{\eta_b}^{\eta} u dz = M, v_0(\eta - \eta_b) = v_0 h = \int_{\eta_b}^{\eta} v dz = N$ なる単位幅流量（以下流量フラックス）を導入すると、(5)式は(7)式を用いて次式のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta_b}^{\eta} (u_0 + u') dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{\eta_b}^{\eta} (v_0 + v') dz + \frac{\partial \eta}{\partial t} \\ = \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta_b}^{\eta} u' dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{\eta_b}^{\eta} v' dz = 0 \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

h は水深だから河床が時間的に変化しなければ、 $\partial h / \partial t = \partial(\eta - \eta_b) / \partial t = \partial \eta / \partial t$ となり、断面平均量で表わした流体の連続式は結局、次式となる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

つぎに、(1)式を $z=\eta_b$ から $z=\eta$ まで積分する。その際、(3)式から、大気圧を基準にして $z=\eta$ で $p=0$ とすると、

$$p = \rho g(\eta - z) \quad \dots\dots\dots(10)$$

なる静水圧近似が成り立つのでこれを用いて(1)式の左辺および右辺はそれぞれつぎのようになる。

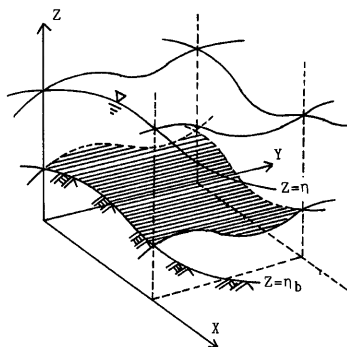


Fig. 1 Definition sketch of coordinate systems.

$$\begin{aligned}
\text{左辺} &\Rightarrow \int_{\eta_b}^{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz \\
&= \int_{\eta_b}^{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uu) + \frac{\partial}{\partial y} (uv) + \frac{\partial}{\partial z} (uw) \right) dz \\
&= \frac{\partial}{\partial t} \int_{\eta_b}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{z=\eta} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta_b}^{\eta} u^2 dz - u^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} \Big|_{z=\eta} \\
&\quad + \frac{\partial}{\partial y} \int_{\eta_b}^{\eta} uv dz - uv \frac{\partial \eta}{\partial y} \Big|_{z=\eta} + uw \Big|_{z=\eta} - uw \Big|_{z=\eta_b} \\
&= \frac{\partial}{\partial t} \int_{\eta_b}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta_b}^{\eta} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{\eta_b}^{\eta} uv dz \dots\dots\dots (11) \\
&\quad \left(\because uw \Big|_{z=\eta} = u \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{z=\eta} + u^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} \Big|_{z=\eta} + uv \frac{\partial \eta}{\partial y} \Big|_{z=\eta}, \quad uw \Big|_{z=\eta_b} = 0 \right)
\end{aligned}$$

ここで, $\beta_{xx} u_0^2 = \frac{1}{\eta - \eta_b} \int_{\eta_b}^{\eta} u^2 dz$, $\beta_{xy} u_0 v_0 = \frac{1}{\eta - \eta_b} \int_{\eta_b}^{\eta} uv dz$ なる運動量補正係数 $\beta_{xx} = \frac{1}{\eta - \eta_b} \int_{\eta_b}^{\eta} \left\{ 1 + \left(\frac{u'}{u_0} \right)^2 \right\} dz$, $\beta_{xy} = \frac{1}{\eta - \eta_b} \int_{\eta_b}^{\eta} \left\{ 1 + \frac{u'v'}{u_0 v_0} \right\} dz$ を導入すると, (11)式は結局次式となる。

$$\text{左辺} \Rightarrow \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{xx} u_0 M) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{xy} v_0 M) \dots\dots\dots (12)$$

一方,

$$\begin{aligned}
\text{右辺} &\Rightarrow \int_{\eta_b}^{\eta} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} dz + \int_{\eta_b}^{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz \\
&= -\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta_b}^{\eta} p dz - p \frac{\partial \eta}{\partial x} \Big|_{z=\eta} + p \frac{\partial \eta}{\partial x} \Big|_{z=\eta_b} \right\} + \nu \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=\eta} - \nu \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=\eta_b} \\
&= -\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta_b}^{\eta} \rho g (\eta - z) dz + \rho g (\eta - \eta_b) \frac{\partial \eta_b}{\partial x} \right\} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) \\
&= -g h \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \quad (\tau_{sx} \div 0) \dots\dots\dots (13)
\end{aligned}$$

ここに, τ_{sx} , τ_{bx} ; それぞれ水面および底面における x 方向のせん断応力である。(12)および(13)式から(1)式は断面平均諸量を用いて次式で表せる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{xx} u_0 M) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{xy} v_0 M) = -g h \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \dots\dots\dots (14)$$

同様に(2)式は

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{yx} u_0 N) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{yy} v_0 N) = -g h \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{by} \dots\dots\dots (15)$$

ここに, $\beta_{yx} = \beta_{xy}$, $\beta_{yy} = \frac{1}{\eta - \eta_b} \int_{\eta_b}^{\eta} \left\{ 1 + \left(\frac{v'}{v_0} \right)^2 \right\} dz$ なる運動量補正係数, τ_{by} ; y 方向の底面せん断応力である。水深が浅く, 水理量の深さ方向の変化が小さい様な二次元平面流れを対象とする時には, $\beta_{xx} = \beta_{xy} = \beta_{yx} = \beta_{yy} \div 1$ とおけ, 近似的に次の各式が成立し, これらがここで用いる基礎方程式となる。

$$x \text{ 方向の運動量式} \quad \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_0 M) + \frac{\partial}{\partial y} (v_0 M) = -g h \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \dots\dots\dots (16)$$

$$y \text{ 方向の運動量式} \quad \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_0 N) + \frac{\partial}{\partial y} (v_0 N) = -g h \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \dots\dots\dots (17)$$

(9)式を再記すると

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (18)$$

ここに, H ; 水位 ($H = \eta = h + z_b$, z_b ; 基準面からの地盤高) である。 τ_{bx} および τ_{by} に関して Manning の抵抗則を用い, 流速成分の比でせん断応力をそれぞれ評価すると,

$$\tau_{bx}/\rho = \frac{g n^2 u_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2}}{h^{1/3}}, \quad \tau_{by}/\rho = \frac{g n^2 v_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2}}{h^{1/3}} \dots\dots\dots (19)$$

ここに, n は Manning の粗度係数である。

2.2 差分式

基礎方程式を直接解くことは困難なため、ここではこれを差分式に直し、数値的に解くことにする。線形微分方程式を差分近似した時、安定条件、収束条件および $\Delta x, \Delta t$ がゼロに収束する極限で差分方程式がもとの微分方程式に収束するための一貫性の条件が満たされた場合、差分による解がもとの方程式の近似解であることが保障されている。しかし、今取り扱うとする方程式系は、慣性項や底面摩擦項という非線形項を含むので差分化には注意を要する。摩擦項として基礎方程式に含まれる非線形項については、Vasilievによって差分化による不安定性の原因となることが指摘され、この項を implicit な形に差分化すればそれが避けられることが示された。ここでも摩擦項については同様にしてこの Vasiliev の不安定を避けるようにする。以下、慣性項の差分化の方法について検討する。慣性項の $\partial(u_0 M)/\partial x, \partial(v_0 M)/\partial y, \partial(u_0 N)/\partial x$ および $\partial(v_0 N)/\partial y$ の差分形をとりあえず XDX, XDY, YDX および YDY とおき、これらの項以外の項を中央差分形で表わすと、 x 方向の運動量方程式である(16)式および(18)式の連続式はそれぞれ次式で表わされる。なお、変数の配列と計算の進め方を Fig. 2 に示す。

x 方向の運動量式

$$\begin{aligned} & \frac{M_{i,j+1/2}^{n+2} - M_{i,j+1/2}^n}{2\Delta t} + XDX + XDY \\ & = -g \frac{(h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1})(H_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - H_{i-1/2,j+1/2}^{n+1})}{2\Delta x} \\ & \quad - g n_{i,j+1/2}^2 \frac{\bar{u}_{i,j+1/2} \sqrt{(u_{i,j+1/2}^n)^2 + (v_{i,j+1/2}^n)^2}}{[(h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1})/2]^{1/3}} \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{連続式} \quad & \frac{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+3} - h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{M_{i+1,j+1/2}^{n+2} - M_{i,j+1/2}^{n+2}}{\Delta x} + \frac{N_{i+1/2,j+1}^{n+2} - N_{i+1/2,j}^{n+2}}{\Delta y} = 0 \\ & \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

ここに、

$$\bar{u}_{i,j+1/2} = \frac{M_{i,j+1/2}^{n+2} + M_{i,j+1/2}^n}{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}} \dots\dots\dots (22)$$

$$u_{i,j+1/2}^n = \frac{2(M_{i,j+1/2}^{n-2} + M_{i,j+1/2}^n)}{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n-1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n-1}} \dots\dots\dots (23)$$

$$\begin{aligned} v_{i,j+1/2}^n = & \frac{1}{4} \left[\frac{2(N_{i+1/2,j+1}^n + N_{i+1/2,j}^{n-2})}{h_{i+1/2,j+3/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+3/2}^{n-1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n-1}} \right. \\ & + \frac{2(N_{i+1/2,j}^n + N_{i+1/2,j}^{n-2})}{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n-1} + h_{i+1/2,j-1/2}^{n-1}} \\ & \left. + \frac{2(N_{i-1/2,j+1}^n + N_{i-1/2,j+1}^{n-2})}{h_{i-1/2,j+3/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+3/2}^{n-1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n-1}} \right] \end{aligned}$$

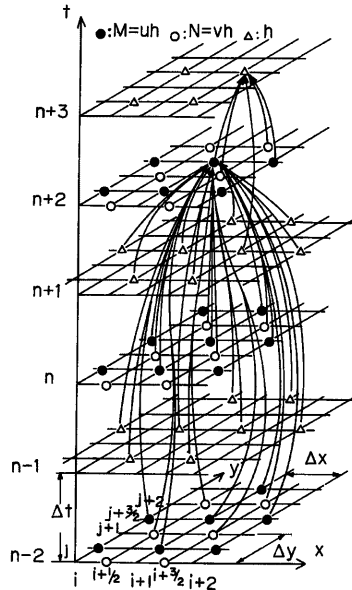


Fig. 2 Grids for two dimensional unsteady flow calculation and arrangement of variables.

$$+ \frac{2(N_{i-1/2,j}^n + N_{i-1/2,j}^{n-2})}{h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n-1} + h_{i-1/2,j-1/2}^{n-1}} \Big] \dots\dots\dots (24)$$

なお、 y 方向の運動量保存則の差分式は紙面の都合上省略する。慣性項の XDX および XDY については u_0 , v_0 の正負により後退、前進差分を使い分ける風上差分を用いることにする。まず、 XDX について検討する。 $\partial(u_0 M)/\partial x$ の u_0 および M の配置を Fig. 3 に示す。その際、 u_0 はメッシュの中央で定義し、 u_0 および M を次式で評価する。

$$u_0 \Rightarrow U_{i+1/2,j+1/2}^n = \frac{M_{i+1,j+1/2}^n + M_{i+1,j+1/2}^{n-2}}{h_{i+3/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+3/2,j+1/2}^{n-1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n-1}} + \frac{M_{i,j+1/2}^n + M_{i,j+1/2}^{n-2}}{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n-1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n-1}} \dots\dots\dots (25)$$

$$M \Rightarrow \bar{M}_{i,j+1/2}^n = \frac{M_{i,j+1/2}^n + M_{i,j+1/2}^{n-2}}{2} \dots\dots\dots (26)$$

この U と $\bar{M}$ を用いると XDX は次のように表わせる。

$$XDX = (U_{i+1/2,j+1/2}^n \bar{M}_{i,j+1/2}^n - U_{i-1/2,j+1/2}^n \bar{M}_{i-1,j+1/2}^n) / \Delta x$$

$$(U_{i+1/2,j+1/2}^n \geq 0, U_{i-1/2,j+1/2}^n \geq 0) \dots\dots\dots (27)$$

$$= (U_{i+1/2,j+1/2}^n \bar{M}_{i,j+1/2}^n - U_{i-1/2,j+1/2}^n \bar{M}_{i,j+1/2}^n) / \Delta x$$

$$(U_{i+1/2,j+1/2}^n \geq 0, U_{i-1/2,j+1/2}^n < 0) \dots\dots\dots (28)$$

$$= (U_{i+1/2,j+1/2}^n \bar{M}_{i+1,j+1/2}^n - U_{i-1/2,j+1/2}^n \bar{M}_{i-1,j+1/2}^n) / \Delta x$$

$$(U_{i+1/2,j+1/2}^n < 0, U_{i-1/2,j+1/2}^n \geq 0) \dots\dots\dots (29)$$

$$= (U_{i+1/2,j+1/2}^n \bar{M}_{i+1,j+1/2}^n - U_{i-1/2,j+1/2}^n \bar{M}_{i,j+1/2}^n) / \Delta x$$

$$(U_{i+1/2,j+1/2}^n < 0, U_{i-1/2,j+1/2}^n < 0) \dots\dots\dots (30)$$

つぎに XDY について検討する。これには2通りの差分化の方法について検討した。まず第1に、 $\partial(v_0 M)/\partial y$ における v_0 および M の配置を Fig. 4 に示すようにとった場合を考える。この場合、 v_0 の正負の符号に関係なく M の正負によってこれを輸送すべき v_0 が決ってしまう。したがってこの差分スキームは v_0 の正負で前進か後退差分をとるという原則からは逸脱するが、とりあえず、この差分スキームについて検討してみる。今、 $v_0 M_1$, $v_0 M_2$ および $v_0 M_3$ をつぎのように定義する。

$$v_0 M_1 = \begin{cases} V_{i+1/2,j-1/2}^n \bar{M}_{i,j-1/2}^n & (\bar{M}_{i,j-1/2}^n \geq 0) \dots\dots\dots (31) \\ V_{i-1/2,j-1/2}^n \bar{M}_{i,j-1/2}^n & (\bar{M}_{i,j-1/2}^n < 0) \dots\dots\dots (32) \end{cases}$$

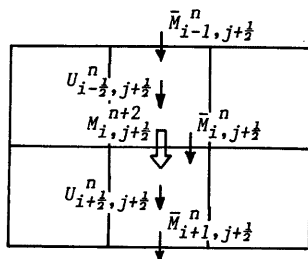


Fig. 3 Arrangement of u_0 and M .

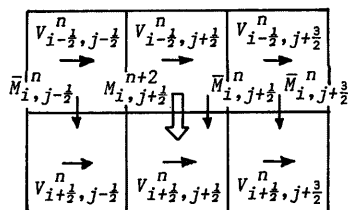


Fig. 4 Arrangement of v_0 and M .

$$v_0 M_2 = \begin{cases} V_{i+1/2, j+1/2}^n \bar{M}_{i, j+1/2}^n & (\bar{M}_{i, j+1/2}^n \geq 0) \\ V_{i-1/2, j+1/2}^n \bar{M}_{i, j+1/2}^n & (\bar{M}_{i, j+1/2}^n < 0) \end{cases} \quad (33)$$

$$v_0 M_3 = \begin{cases} V_{i+1/2, j+3/2}^n \bar{M}_{i, j+3/2}^n & (\bar{M}_{i, j+3/2}^n \geq 0) \\ V_{i-1/2, j+3/2}^n \bar{M}_{i, j+3/2}^n & (\bar{M}_{i, j+3/2}^n < 0) \end{cases} \quad (34)$$

$$v_0 M_3 = \begin{cases} V_{i+1/2, j+3/2}^n \bar{M}_{i, j+3/2}^n & (\bar{M}_{i, j+3/2}^n \geq 0) \\ V_{i-1/2, j+3/2}^n \bar{M}_{i, j+3/2}^n & (\bar{M}_{i, j+3/2}^n < 0) \end{cases} \quad (35)$$

$$v_0 M_3 = \begin{cases} V_{i+1/2, j+3/2}^n \bar{M}_{i, j+3/2}^n & (\bar{M}_{i, j+3/2}^n \geq 0) \\ V_{i-1/2, j+3/2}^n \bar{M}_{i, j+3/2}^n & (\bar{M}_{i, j+3/2}^n < 0) \end{cases} \quad (36)$$

ここに,

$$V_{i+1/2, j+1/2}^n = \frac{N_{i+1/2, j+1}^{n-2} + N_{i+1/2, j+1}^{n-2}}{h_{i+1/2, j+3/2}^{n+1} + h_{i+1/2, j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2, j+3/2}^{n-1} + h_{i+1/2, j+1/2}^{n-1}} + \frac{N_{i+1/2, j}^{n-2} + N_{i+1/2, j}^{n-2}}{h_{i+1/2, j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2, j-1/2}^{n+1} + h_{i+1/2, j+1/2}^{n-1} + h_{i+1/2, j-1/2}^{n-1}} \quad (37)$$

(31)式～(36)式を用いて XDY を次式で評価する。

$$XDY = \left(\frac{v_0 M_3 + v_0 M_2}{2} - \frac{v_0 M_2 + v_0 M_1}{2} \right) / \Delta y \quad (38)$$

この方法で求めた XDX , XDY および同様にして求める $YDX(\partial(u_0 N)/\partial x)$ の差分式, $YDY(\partial(v_0 N)/\partial y)$ の差分式) を用いて破堤による氾濫計算を行ったところ, 計算はある程度安定に行われるものの, 三角形に

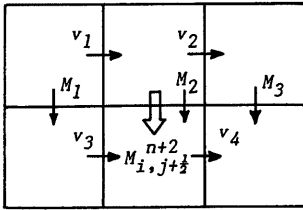


Fig. 5 Arrangement of v_0 and M .

$M_1 \sim M_3$ および $v_1 \sim v_4$ を次式で定義する。

$$M_1 = \bar{M}_{i-1, j+1/2}^n, \quad M_2 = \bar{M}_{i, j+1/2}^n, \quad M_3 = \bar{M}_{i+1, j+1/2}^n \quad (39)$$

$$v_1 = \frac{2(N_{i-1/2, j+1}^{n-2} + N_{i-1/2, j}^{n-2})}{h_{i-1/2, j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2, j-1/2}^{n+1} + h_{i-1/2, j+1/2}^{n-1} + h_{i-1/2, j-1/2}^{n-1}} \\ v_2 = \frac{2(N_{i-1/2, j+1}^{n-2} + N_{i-1/2, j+1}^{n-2})}{h_{i-1/2, j+3/2}^{n+1} + h_{i-1/2, j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2, j+3/2}^{n-1} + h_{i-1/2, j+1/2}^{n-1}} \\ v_3 = \frac{2(N_{i+1/2, j}^{n-2} + N_{i+1/2, j}^{n-2})}{h_{i+1/2, j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2, j-1/2}^{n+1} + h_{i+1/2, j+1/2}^{n-1} + h_{i+1/2, j-1/2}^{n-1}} \\ v_4 = \frac{2(N_{i+1/2, j+1}^{n-2} + N_{i+1/2, j+1}^{n-2})}{h_{i+1/2, j+3/2}^{n+1} + h_{i+1/2, j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2, j+3/2}^{n-1} + h_{i+1/2, j+1/2}^{n-1}} \quad (40)$$

つぎに, XDY をとりあえず次式のようにおく。

$$XDY = \{(v_0 M)_f - (v_0 M)_b\} / \Delta y \quad (41)$$

ここに, $(v_0 M)_f$ および $(v_0 M)_b$ はそれぞれ M_2, M_3, v_2, v_4 および M_1, M_2, v_1, v_3 から求まる運動量であって, 風上差分によると $v_1 \sim v_4$ および $M_1 \sim M_3$ の正負によって $(v_0 M)_f$ および $(v_0 M)_b$ はそれぞれ次のような場合が考えられる。

$$(v_0 M)_f = (v_4 M_2 + v_2 M_3) / 2 \quad (v_4 \geq 0, v_2 < 0, M_2 \geq 0, M_3 < 0) \quad (42)$$

$$(v_0 M)_f = (v_4 M_3 + v_2 M_2) / 2 \quad (v_4 < 0, v_2 \geq 0, M_2 < 0, M_3 \geq 0) \quad (43)$$

$v_4 M_2$	$(v_4 \geq 0, v_2 < 0, M_2 \geq 0, M_3 \geq 0 \text{ or } v_4 \geq 0, v_2 \geq 0, M_2 \geq 0, M_3: \text{任意}) \dots\dots\dots$	(44)
$v_4 M_3$	$(v_4 < 0, v_2 \geq 0, M_2 \geq 0, M_3 \geq 0 \text{ or } v_4 < 0, v_2 < 0, M_2: \text{任意}, M_3 \geq 0) \dots\dots\dots$	(45)
$v_2 M_3$	$(v_4 \geq 0, v_2 < 0, M_2 < 0, M_3 < 0 \text{ or } v_4 < 0, v_2 < 0, M_2: \text{任意}, M_3 < 0) \dots\dots\dots$	(46)
$v_2 M_2$	$(v_4 < 0, v_2 \geq 0, M_2 < 0, M_3 < 0 \text{ or } v_4 \geq 0, v_2 \geq 0, M_2 < 0, M_3: \text{任意}) \dots\dots\dots$	(47)
0	(上記以外の場合) $\dots\dots\dots$	(48)
$(v_0 M)_b = (v_3 M_1 + v_1 M_2)/2$	$(v_3 \geq 0, v_1 < 0, M_1 \geq 0, M_2 < 0) \dots\dots\dots$	(49)
$(v_3 M_2 + v_1 M_1)/2$	$(v_3 < 0, v_1 \geq 0, M_1 < 0, M_2 \geq 0) \dots\dots\dots$	(50)
$v_3 M_1$	$(v_3 \geq 0, v_1 < 0, M_1 \geq 0, M_2 \geq 0 \text{ or } v_3 \geq 0, v_1 \geq 0, M_1 \geq 0, M_2: \text{任意}) \dots\dots\dots$	(51)
$v_3 M_2$	$(v_3 < 0, v_1 \geq 0, M_1 \geq 0, M_2 \geq 0 \text{ or } v_3 < 0, v_1 < 0, M_1: \text{任意}, M_2 \geq 0) \dots\dots\dots$	(52)
$v_1 M_2$	$(v_3 \geq 0, v_1 < 0, M_1 < 0, M_2 < 0 \text{ or } v_3 < 0, v_1 < 0, M_1: \text{任意}, M_2 < 0) \dots\dots\dots$	(53)
$v_1 M_1$	$(v_3 < 0, v_1 \geq 0, M_1 < 0, M_2 < 0 \text{ or } v_3 > 0, v_1 \geq 0, M_1 < 0, M_2: \text{任意}) \dots\dots\dots$	(54)
0	(上記以外の場合) $\dots\dots\dots$	(55)

$(v_0 M)_f$ と $(v_0 M)_b$ との組合せは $7 \times 7 = 49$ 通りであるが、両者は M_2 を含んでいるため互いに独立ではなく、(42)式では(49)および(53)式との組合せはない。同様に、(43)式と(50)および(52)式、(44)式と(49)および(53)式、(47)式と(50)および(52)式との組合せはなく、結局独立な組合せは41通りである。流れのパターンが上記のどの組合せになるかを判断し、(41)式から XDY を求めればよい。

以上で x 方向の運動量方程式の差分化が完了したが、 XDY については第2番目の差分スキームを採用することにする。なお、慣性項の差分化を行う際に水深および流量フラックスに各々時間的に2ステップ前の値を用いて平均化を行っているが、これは岩佐ら³⁾の方法によった。

2.3 家屋群中を通過する氾濫水の取り扱い

市街地の家屋群中を氾濫水が通過する場合、家屋やその他の構造物などによる水流断面の変化により水位変化や流量変化が生じる。木造家屋の流失危険範囲やより正確な浸水深等を予測するためには、市街地家屋群の影響を考慮した氾濫計算が必要となる。従来、市街地や田畑、森林といった領域にそれぞれ適当な等価粗度係数や等価摩擦係数を与えて計算が行われてきた。例えば、Xanthopoulos ら²⁾は市街地域に対して $n = 0.067$ 、耕作地には0.025、樹木地帯および低木地帯ではそれぞれ0.040, 0.033といった粗度係数を与え、地表面の状態に応じた摩擦力による抵抗を用いた計算を行っている。相田³⁾は津波の陸上への遡上問題で、家屋群の遮蔽によるエネルギー損失を等価摩擦係数 f_e で与え、家屋の密集度が高い所などは $f_e = 0.1$ を与えている。中川ら⁴⁾は、ある程度家屋群の影響を考慮した計算が、その密集度の違いにより適当な粗度係数を格子毎に与えることで行えることを示している。しかしながら、実際の氾濫の場合は種々の家屋密度をもっており、等価摩擦係数や等価粗度係数をどのように決めればよいかが問題となる。後藤ら⁵⁾は定常流の場合で求められた構造物群中での流れの抵抗則を非定常流場へ適用する際に、等価粗度係数を次式で評価している。

$$n_e = \frac{h^{4/3}}{2gl_1} \left(\frac{1}{c_e^2} - 1 \right) \dots\dots\dots (56)$$

ここに、 n_e ；等価粗度係数、 l_1 ；家屋群の最前列から縮流によるエネルギー損失が卓越する領域までの長さ、 c_e 流量係数で、Froude 数と縮流係数との関数で表わされる。同式において、非定常流の場合への適用性の問

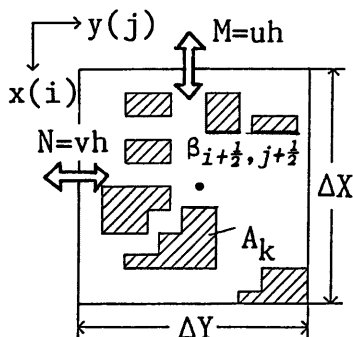


Fig. 6 Definition sketch of treatment of houses in a mesh.

Fig. 6 に示すような 1 格子を考え、メッシュ中央 $(i+1/2, j+1/2)$ で定義した通過率を次式で評価した。

$$\beta_{i+1/2, j+1/2} = \sqrt{1 - \sum_k A_k / \Delta x \Delta y} \quad (57)$$

ここに、 A_k は格子内に占める 1 家屋の面積である。この通過率を用いて次式のような流量フラックスの補正を行った。

$$\tilde{M}_{i, j+1/2}^{n+2} = \beta_{i, j+1/2} M_{i, j+1/2}^{n+2} \begin{cases} M_{i, j+1/2}^{n+2} \geq 0 : a = i+1/2 \\ M_{i, j+1/2}^{n+2} < 0 : a = i-1/2 \end{cases} \quad (58)$$

$$\tilde{N}_{i+1/2, j}^{n+2} = \beta_{i+1/2, j} N_{i+1/2, j}^{n+2} \begin{cases} N_{i+1/2, j}^{n+2} \geq 0 : b = j+1/2 \\ N_{i+1/2, j}^{n+2} < 0 : b = j-1/2 \end{cases} \quad (59)$$

(58)および(59)式で補正された流量フラックスを連続式に代入すると、水深は次式で求まる。

$$h_{i+1/2, j+1/2}^{n+3} = h_{i+1/2, j+1/2}^{n+1} - \frac{2\Delta t}{\Delta x} (\tilde{M}_{i+1, j+1/2}^{n+2} - \tilde{M}_{i, j+1/2}^{n+2}) - \frac{2\Delta t}{\Delta y} (\tilde{N}_{i+1/2, j+1}^{n+2} - \tilde{N}_{i+1/2, j}^{n+2}) \quad (60)$$

3. 実験と数値シミュレーションによる氾濫過程の検討

3.1 実験装置および方法

実験装置は Fig. 7 に示すような 1.84 m 四方の発泡スチロール製の水平に設置した氾濫台とその一辺に幅 20 cm のゲートを架設した貯水槽から成っている。氾濫台に縦 2.5 cm、横 2.5 cm、高さ 3 cm のウレタン製のブロックを格子状に配置し、ゲートを瞬時に引き上げて市街地家屋群中での破堤氾濫を模擬した。

測定項目は、氾濫形状の時間変化および破堤口中心線上の破堤口から 0 cm、50 cm、100 cm および 150 cm の 4 地点における水深の時間変化である。氾濫形状の時間変化はビデオカメラで撮影し、水深の時間変化は 4 台のサーボ式水位計で計測した。なお、水位データは 125 Hz のサン

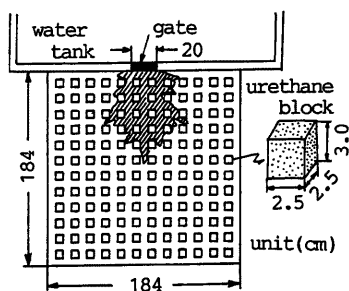


Fig. 7 Experimental setup.

プリング速度でデーターレコーダーに収録した。

破堤口における流入流量のハイドログラフを以下のようにして求めた。すなわち、破堤口前面においてサーボ式水位計で水深を求め、同時に、トレーサーを流してそれを高速度ビデオカメラで撮影し、画像解析により表面流速を読んで流量を求めた。これから得られた破堤口からの流量ハイドログラフおよび水深を Fig. 8 に示す。実験条件を Table 1 に示す。ここでは、氾濫台上に家屋群を配置しない CASE 1, ブロック間隔 B が 5.5 および 10.5 cm の CASE 2 および CASE 3 の 3 ケースを対象としている。なお、貯水槽内の初期水深 H_0 はすべてのケースについて 5 cm, 破堤幅 B_0 は 20 cm であり、氾濫台上に流出した氾濫水は台の縁に達すると段落ち流れとなる。

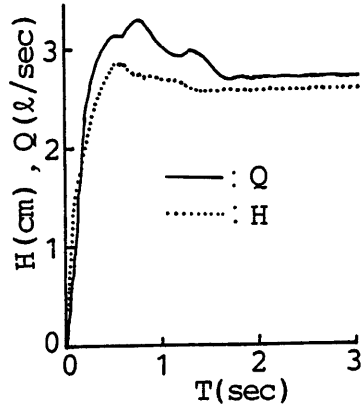


Fig. 8 Hydrograph and water depth at bank breach point.

3.2 実験結果と計算結果との比較

計算条件を Table 2 に示す。氾濫台の一边は堤防(水槽壁)であるので不透過の条件を用い、残り3辺は実験条件と同じく段落ち流れとして計算した。計算で用いた粗度係数は、氾濫台上に一次元水路を設け、定常等流実験を行って求めた粗度係数 $n=0.01$ である。先端条件としては threshold 水深を用い、これを 1 mm とした。

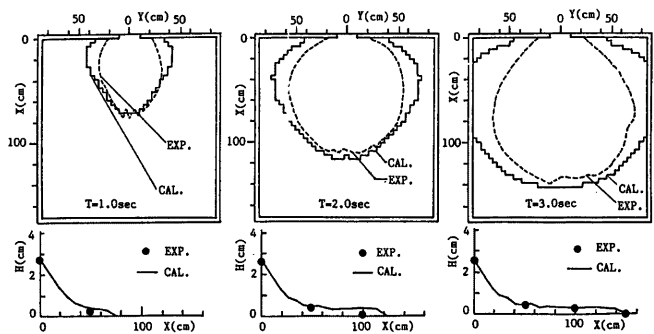
Fig. 9(a)~(c) は各ケースの実験値および計算値の破堤後 1 秒, 2 秒および 3 秒の氾濫形状と破堤口中心線上の水面形状を比較したものである。CASE 1 では計算値が弱干中ぶくらの拡がり方をしているが、実験値同様のほぼ円形状に拡がるのが再現されており、一様場における本計算手法の妥当性が認められる。CASE 2 および CASE 3 は通過率を導入した方法をとっている。この 2 ケースでは空間差分間隔を $\Delta x = \Delta y = 5$ cm としており、ブロックが 2.5 cm 四方であるのでブロックを含む格子の通過率 β はすべて $0.87 (= \sqrt{1-0.25})$ となる。CASE 2 では実験値および計算値とも三角形の氾濫形状となっており、両者はかなり良く一致している。また、水深に関してもほぼ一致している。CASE 3 では x 方向のフロントの進行速度に関しては実験値と計算値は良く一致しているが、 y 方向のそれは計算値の方が速くなっている。また、実験値では斜め方向に吉状の拡がりが見られるが計算ではこれが再現できていない。これは、実験では斜め方向に形成される流路の遮蔽効果が小さく、フロントの斜め方向の進行が大きくなるのに対し、計算では斜め方向の流路といった存在が考慮されておらず、平均的な通過率で表現されているためであると思われる。したがって、通過率の取り扱いに関して、 x 方向、 y 方向あるいは斜め方向に流路が形成されて流水がその方向へ進行しやすくなるといった流れの場の情報を与えて、これが反映されるような計算をする必要がある。しかしながら、計算値は実験値を包絡するような拡がり呈しており、上述したような改善されるべき問題点はあるものの、通過率を用いた氾濫計算法である程度実験結果が説明されることが判明した。

Table 1 Experimental conditions.

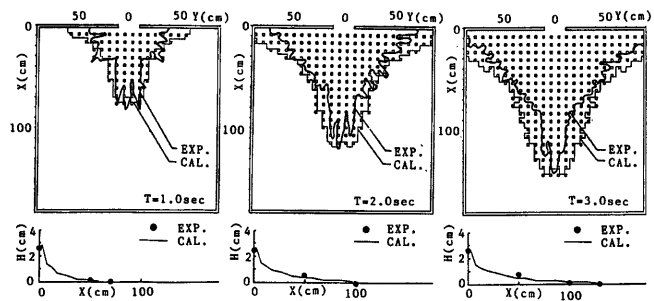
	CASE	B (cm)
$B_0=20$ cm	1	
$H_0=5$ cm	2	5.5
$i=0$	3	10.5
$n=0.01$		

Table 2 Calculation conditions.

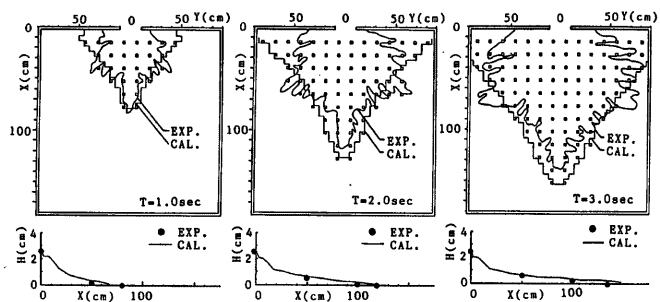
	CASE	B (cm)	ΔX (cm)	ΔY (cm)
$B_0=20$ cm	1		4.0	4.0
$H_0=5$ cm	2	5.0	5.0	5.0
$i=0$	3	10.0	5.0	5.0
$\Delta t=1/1000$ sec				



(a) (CASE 1)



(b) (CASE 2)



(c) (CASE 3)

Fig. 9 Comparison between experimental results with calculated ones.

4. 巨椋流域を対象とした洪水危険度評価

3において、家屋群が存在する場での洪水氾濫水の挙動について実験および数値シミュレーションを行い、2で示した数値計算法である程度実験結果が説明されることが明らかにされた。ここでは、この計算法を木津川と宇治川とで囲まれた旧巨椋池の集水区域である京都盆地南部地域（以下巨椋流域と呼ぶ）に適用して氾濫計算を行い、満水深の分布および木造家屋の流失危険範囲の予測を行う。

4.1 流域の概要と過去の災害

対象域は木津川の山城大橋および宇治川の天ヶ瀬ダムから両河川と桂川との三川合流点までの流域面積約 52 km² の領域であって、近年市街化の進行と人口の増加が著しい地域である。Fig. 10 および Fig. 11 はそれぞれ現時点における流域の家屋密度（1メッシュ内に占める家屋面積の総和の百分率、ただし1メッシュは 125 m 四方である。）の分布および地盤高の分布を示したものである。近鉄京都線沿いの低平地帯に家屋密度の高い市街地が形成されており、この周辺は現在もさらに田畑の宅地化が進行している所である。さらに、山城大橋から下流約 1.8 km 地点の水衝部にあたる木津川右岸堤の直下にも最近かなりの住宅が建設され、家屋密度がかなり高い値をもっている。この地域を地形的にみると、平均的な標高が 10 m 程度の巨椋池干拓地を中心にすりばち状になっており、木津川右岸堤あるいは宇治川左岸堤のどの地点が決壊しても氾濫水はこの干拓地へ向かっ

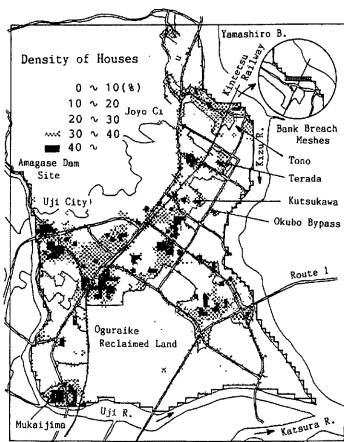


Fig. 10 Distribution of density of houses in the calculation domain.

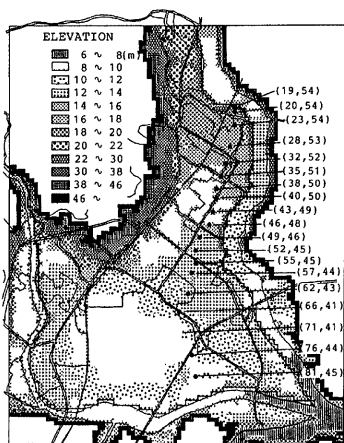


Fig. 11 Elevation in the study area.

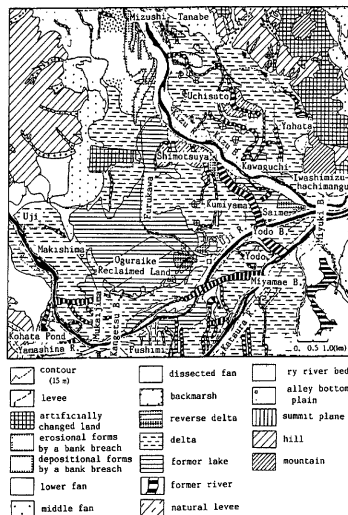


Fig. 12 Classification of the topography in the southern part of the Kyoto basin.

て進行し、集水、湛水するものと思われる。

Fig. 12 は巨椋流域の水害地形分類⁹⁾を示したものである。この流域の大部分は旧湖沼、湖沼性デルタあるいは木津川の後背湿地から成っており、旧河道もかなり存在している。木津川右岸の水主、下津屋には破堤による堆積あるいは侵食地形も存在し、特に水主付近では幅約 1km、長さ約 3km にわたっている。このことから、この地区で過去にかなり大規模な破堤による災害があったものと推察される。**Fig. 13** は巨椋流域における過去の堤防決壊箇所を示したものである⁷⁾。江戸期において、寛永 7 年洪水から嘉永 3 年 8 月 24 日洪水まで、これらを含めて 8 つの洪水が記録されている。特に、正徳 2 年 8 月 18 日の洪水では、枇杷庄村（現城陽市）、東上津屋（現城陽市）、島田（現久御山町）等の各所で破堤が生じている。「月堂見聞八」には以下の記録が残されている。『富野、きれ所二ヶ所、流家百軒許、死人数不明、東西水主、びわの庄八町なし、上津屋きれ所一ヶ所死人数不知……』⁸⁾。木津川の弯曲部右岸側の水衝部にあたる富野村では、弘化 3 年 7 月 7 日および萬延元年の洪水で破堤し、現在でもこれを『六ヶ池切れ』災害としてこの地区では語り継がれている。明治 18 年の台風性洪水により、木津川では前述した枇杷庄村で『若王寺切れ』が起こったが、これを最後に現在に至るまで本川の破堤は生じていない。これらの木津川における破堤の事実と、**Fig. 12** に示した水害地形分類図における破堤性侵食・堆積地形との対応が十分に考えられ、この分類図によっても氾濫計算における想定破堤地点が種々選定できるものと思われる。宇治川に関しても明治以前および以後に

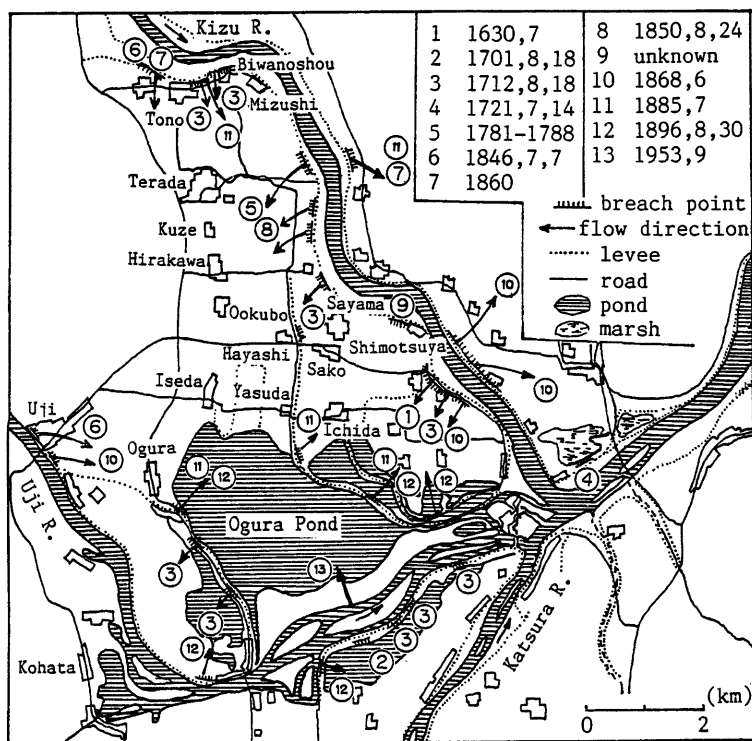


Fig. 13 So far breached points in the Ogura basin.

においても各所で堤防決壊が生じているが、最近では昭和28年の台風13号による洪水で向島地内宇治川左岸堤大黒地点において破堤幅が約 600 m の決壊が生じ、大災害を引き起こしている。

今回の計算においては、想定破堤地点を以下の理由により、上述の木津川彎曲部の水衝部にあたる右岸堤に選ぶことにする。

- 1) この富野庄および枇杷庄付近の水衝部は過去数度にわたる破堤の事実がある。
- 2) 水害地形分類図から水主付近で土砂氾濫堆積の痕跡が認められ、過去破堤による大災害が発生したであろうと推察される。
- 3) この地域は現在、田畑の宅地化が急速に進行し、堤防直下にも多くの住宅が建設されてきており、1)および2)の事実からみて、災害ポテンシャルがかなり高くなっている。こういった地域での災害危険度がどの程度なのかという災害科学的な興味。

なお、言うまでもなく破堤箇所として種々の地点を想定し、同じ水理条件のもとでどのように災害規模や形態が異なり、最重要となるような破堤地点はどこなのか、いつまでにどこへ避難すればよいか、また、洪水規模の生起確率と被害の期待値からみてどのようなハード対策が最も有効か、といった問題点に対する検討は当然必要ではあるが、それは今後の研究課題としてここでは取り上げないことにする。

4.2 計算条件

計算対象領域は **Fig. 10** の太線の堤内地側部分である。空間差分間隔を $\Delta x = \Delta y = 125$ m とし、差分時間々隔 Δt を 5 秒として計算を行った。計算に用いた木津川および宇治川の流量ハイドログラフを **Fig. 14** に示す。木津川の流量は山城大橋地点で、宇治川のそれは天ヶ瀬ダム地点で与えている。なお、これらの流量はモデル流量であって各河川の計画洪水とは直接関係ない。ちなみに、木津川の計画洪水流量は、土師地

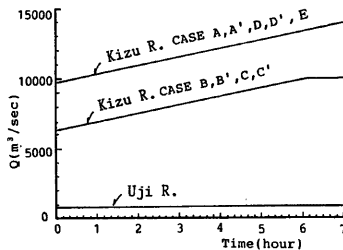


Fig. 14 Hydrographs for calculation.

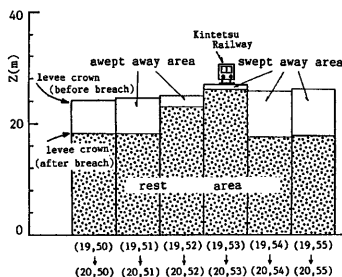


Fig. 15 Scales and elevations of breached points meshes in calculation before and after the bank breach.

点で $6,100 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、宇治川のそれは、宇治で $1,500 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。図中の $\text{Time}=0$ における流量を定常的に各流入端から与え、流れが定常に達した時点初期条件とし、破堤開始を $\text{Time}=0$ とした。流出条件については水面勾配で流れるものとしたが、この時桂川の合流は考慮していない。さらに、山科川等支川の流入や排水路網もここでは考慮していない。

計算条件を **Table 3** に示す。表中、「discharge」の欄

Table 3 Test cases for simulation analysis.

CASE	discharge	condition of the bank breach	inland condition
A	high	instant	existence of houses
A'	high	instant	no houses
B	low	instant	existence of houses
B'	low	instant	no houses
C	low	10 minutes	existence of houses
C'	low	10 minutes	no houses
D	high	10 minutes	existence of houses
D'	high	10 minutes	no houses
E	high	instant	existence of houses

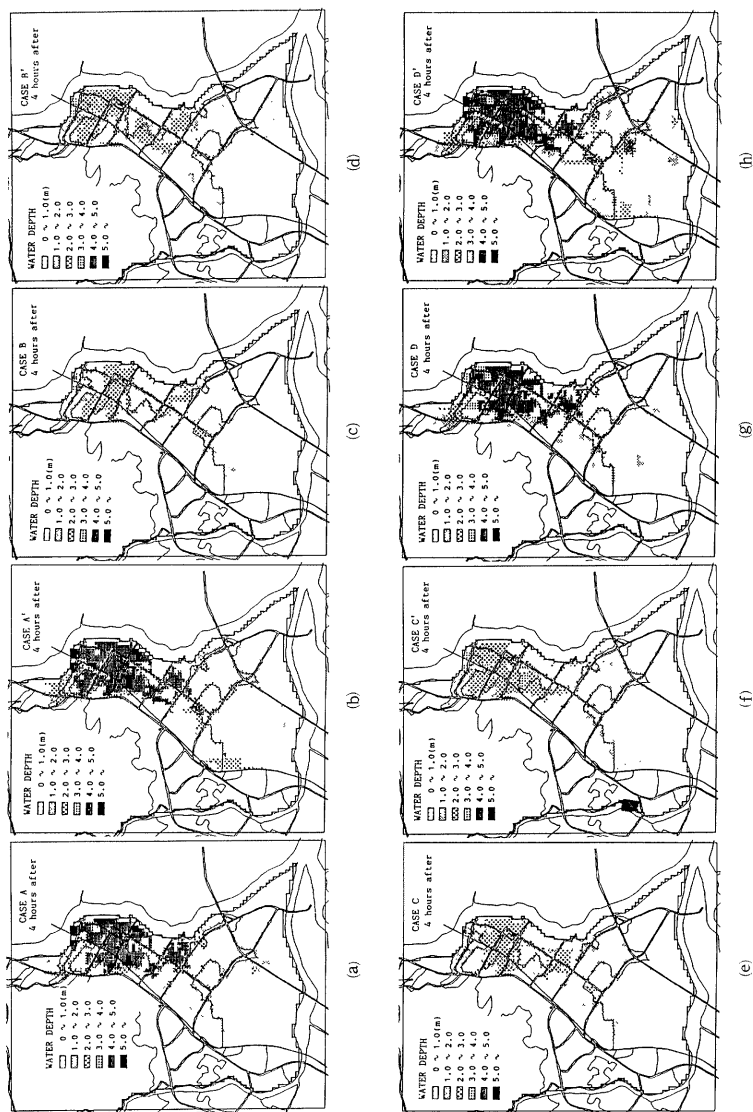


Fig. 16 Calculated results for the distribution of water depth at 4 hours after bank breach.

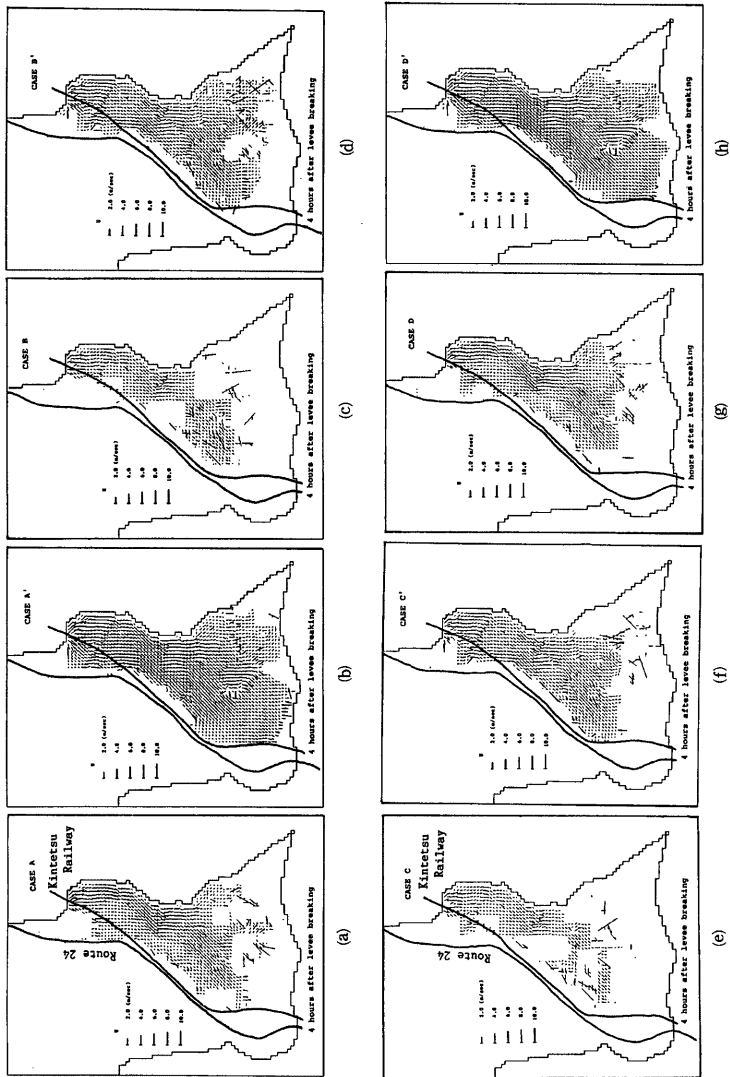


Fig. 17 Calculated results for flow patterns at 4 hours after bank breach.

の「high」のケースは、堤防高が高い場合の破堤に対応し、「low」のケースはそれが低い場合に対応する。破堤条件は瞬時に破堤する場合、すなわち Time=0 で堤防地盤高が瞬時に1メッシュ堤内地側の地盤高と等しくなる場合と、それが10分間で完了する場合の2通りを考えることにした。破堤規模は Fig. 15 に示すように、6メッシュ(750 m)とし、同図には破堤前後の堤防天端高も示されている。また、堤内地条件として家屋群の存在を考慮する場合としない場合を考え、考慮するケースについては Fig. 10 に示した堤内地家屋密度を用いて2.3で述べた手法を適用して氾濫計算を行った。さらに、流失が生じた場合、その影響がその周囲のメッシュに波及することが考えられるので、これを考慮するために流失条件が満足されれば以後そのメッシュの通過率を1に置き換えた計算も行う。したがって合計9ケースの計算を行った。

4.3 計算結果

(1) 浸水深の分布と流速ベクトル CASE A～D' に関して、Fig. 16(a)～(h) に破堤4時間後の浸水深の分布を、Fig. 17(a)～(h) に流速ベクトルの分布を、Fig. 18(a)～(h) に Fig. 11 に示した各格子における水位の時間変化を示す。まず、浸水深の分布について検討する。破堤4時間で全ケースとも氾濫水は巨椋池干拓地まで進行しており、特に CASE A', D' では3 m 以上の湛水を生じている。さらに、城陽市の富野、寺田、久津川および久御辺町の一部などは4 m 以上も湛水している。CASE B, B', C, C' は流量が小さいため、湛水規模・範囲も当然小さくなっている。氾濫域は国道24号線および近鉄京都線によってかなり規定されていることがわかる。破堤4時間後では巨椋池干拓地の氾濫水は近鉄京都線の盛土を越えて向島地区へ進行していないが、このまま湛水が進むとこの地区へも氾濫することが予想され、排水などによる処置が重要となろう。瞬間破堤と10分破堤では顕著な差は出ていないが、家屋群を考慮した計算ではない計算に比べて氾濫域および規模が小さくなっている。これは、破堤口からの流入流量が家屋群によって遮蔽されるために小さくなり、氾濫後も格子内の流量が小さくなるよう補正されるからである。破堤口近傍ではその分水深が増加することが水位の時間変化の図からも明らかである。

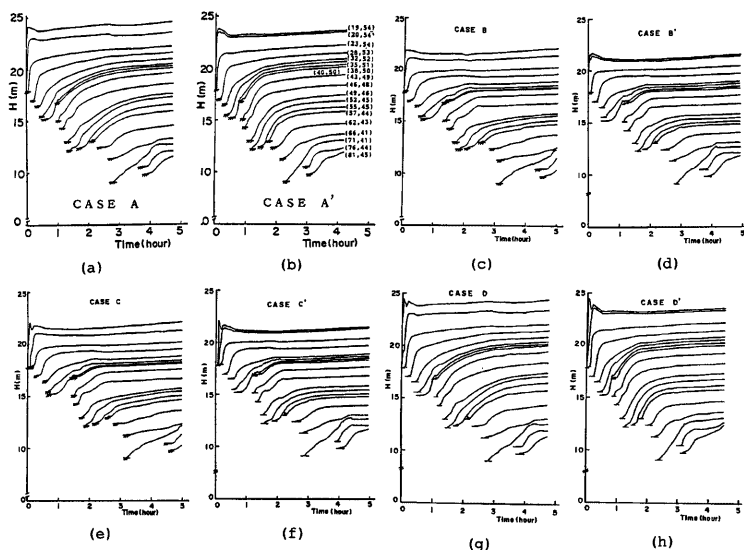


Fig. 18 Changes of water level at each point shown in Fig. 11.

つぎに流速ベクトルについてみてみよう。各図には近鉄京都線が記されているが、破堤口中央部のメッシュとその堤内地側に盛土が施されていて、ここで氾濫水を2分する形となっている。氾濫水は寺田と久津川の間で合流し、その下流で大久保バイパスとほぼ平行して流れ、特に CASE A', D' ではかなり強い流れとなっている。その後、近鉄京都線に沿って流下する部分や木津川右岸堤に沿って国道1号線の方へ流れる部分などが見られる。氾濫水先端部の伝播速度については、Fig. 18 から明らかなように、(81, 45) のメッシュでは CASE A', D' と CASE B, C で90分程度、CASE A と CASE A' でも60分程度の差が出ている。なお、伝播速度の大きい順に CASE を並べると A', D', A, D, B', C', B, C となる。

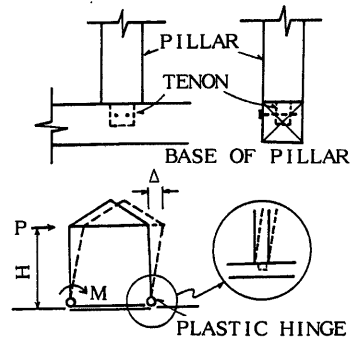


Fig. 19 Behavior of tenons as plastic hinges subject to lateral loads.

(2) 木造家屋の流失危険度分布 在来軸組工法による木造家屋では、土台と柱の接合部は Fig. 19 に示すようにほぼ構造であり、水平外力に対してここが塑性ヒンジとなって挙動し、過度の変形によって破壊に至るものと考えられる。著者ら⁹⁾は前報で、流体力によるほぞ周りのモーメントを用いて木造家屋の流失危険指標として次式を提案した。

$$uh \geq \sqrt{M_V / (hc / h \cdot C_D / 2 \cdot \rho)} / \sqrt{B} \quad \dots\dots\dots (61)$$

ここに、 u ；断面平均流速 (m/sec)、 h ；水深 (m)、 M_V ；在来軸組工法による木造家屋の耐力モーメント (N・m)、 hc ；流体力の作用高さ (m)、 C_D ；抗力係数、 ρ ；水の密度 (kg/m³)、 B ；流体力が作用する家屋幅 (m) である。上式を二次元洪水氾濫場に適用し、家屋の流失危険度を評価した結果について考察する。その際、 h に関しては (25) 式で求まる $h_{i+1/2, j+1/2}^{n+2}$ を用いるものとし、流速 u としては通過率 β で補正された流量フラックスを用いて次式で評価する。

$$u = \{ (\tilde{M}_{i+1/2, j+1/2}^{n+2} + \tilde{M}_{i+1, j+1/2}^{n+2})^2 + (\tilde{N}_{i+1/2, j}^{n+2} + \tilde{N}_{i+1/2, j+1}^{n+2})^2 \}^{1/2} / (2h_{i+1/2, j+1/2}^{n+2}) \quad \dots\dots\dots (62)$$

(61) 式の諸量に関して、各々 $M_V = 418730$ (N・m)、 $C_D / 2 = 1.064$ 、 $hc / h = 0.732$ 、 $\rho = 1000$ (kg/m³)、 $B = 10$ (m) を用いると¹⁰⁾、

$$M_C = u_c h_c \geq 7.3 \text{ (m}^2/\text{sec)} \quad \dots\dots\dots (63)$$

が流失危険度指標となる。ここでは、氾濫計算から求まる uh の値が M_C より大きいと流失危険度を100%とし、20%ごとに5段階に分けて流失危険度を示すことにする。

Fig. 20(a)～(h) は、破堤後4時間内における木造家屋の流失危険度の最大値の分布を示したものである。なお、CASE A', B', C' および D' は家屋群を考慮していないので通過率はすべてのメッシュにおいて1である。流量が大きい CASE A, A', D, D' では破堤口近傍で流失危険度100%の領域があり、その直下流に80%の領域が存在している。CASE A, D において80%のところは CASE A', D' ではすべて100%に増加している。CASE B, B', C, C' では流量が小さいため100%の領域はほとんどない。流速ベクトル図で見たように、CASE A', D' において寺田と久津川付近で合流によると見られるかなり強い流れが生じていたが、この図でも流失危険度が80%と大きくなっている。従来、家屋群による遮蔽効果を考慮しないで氾濫計算を行い、流体力の分布と流失・全壊あるいは半壊家屋の分布との相関がとられ、流失危険度が評価されてきたが^(11-12, 13)、この方法ではかなり危険側に評価していることが今回のシミュレーション結果からわかる。

さて、一旦家屋が流失するとその後方に存在する家屋は流失した家屋の影響のみならず直接流水抵抗を受け、より危険な状態になるものと思われる。Fig. 21 はその影響をみるために行った CASE E について家屋の流失危険度分布を示したものである。これより CASE A と比べてみて、流失危険度が減少したメッ

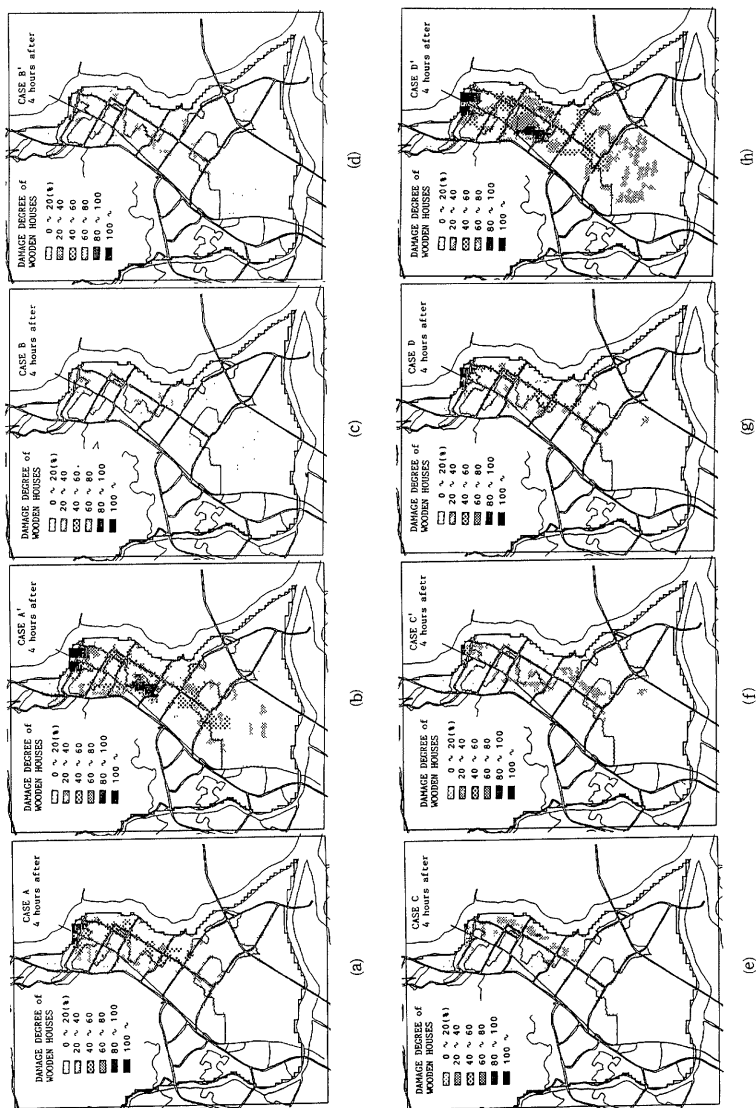


Fig. 20 Calculated results about maximum degree of flash out risk of wooden houses.

メッシュもあれば増加したメッシュもある。これはつぎのような理由によるものと考えられる。すなわち、今、破堤口近傍の (i, j) , (j', j') という座標点 P , Q を考え、このメッシュが CASE A では両方とも流失危険度が100%であり、かつ P 点が先に流失危険度100%に達するとする。CASE E では P 点の流失危険度が100%になった時点でそのメッシュへ河道水が集中して流量が増加し、 P 点後方のメッシュの危険度が増加することになる。流量の集中が P 点に移ったために Q 点への流入流量が減少し、 Q 点の流失危険度が低下する。一方、CASE A では通過率が時間的に変化しないからどちらのメッシュが先に流失危険度が100%になろうが関係ない。このようにして、前方にある家屋が流失した場合にそれが後方の家屋にどの程度影響するかということをメッシュの通過率を変えることでメッシュオーダーである程度評価可能である。実際にはメッシュオーダーでなく1家屋単位の現象であることおよび、流木や流失した家屋の材木がその下流の家に与える影響がかなり大きいと思われることなどから、これらの影響をも考慮した取り扱いも今後検討する必要がある。

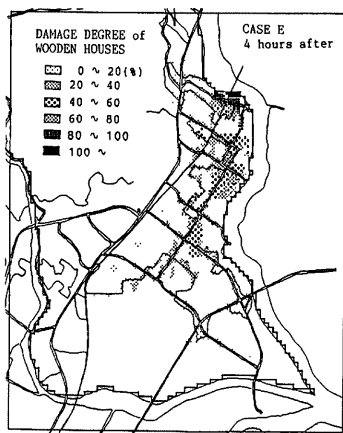


Fig. 21 Calculated results about maximum degree of flash out risk of wooden houses in the case that flow rate coefficient β is taken to unity if houses are swept away in a mesh.

4.4 氾濫計算を用いた被害の定量化に関する検討

地域の洪水災害危険度を評価するには、洪水災害危険度とは何か、を明確に認識したうえでそれを定量化する必要がある。それには人命の被害は別にして、一般資産（家屋、家庭用品、事業用および農漁業用資産）の被害額、農作物の被害額、冠水に伴う営業停止の被害額、公共土木施設等の被害額および農地の被害額等を推定して対象洪水の生起確率に対する期待値で評価するのも1つの方法だと思われる。二次元氾濫計算では各メッシュ毎に一般資産等の資産情報や農作物の種類とその量等の情報を与え、計算された水深や流速さらには土砂堆積¹⁴⁾等の情報を結合して、治水経済調査要綱¹⁵⁾に記されている被害率を用いて被害額をある程度容易にしかもかなりの精度で算定しようというメリットがある。さらに、破堤地点をメッシュオーダーで選定できるので破堤規模および破堤位置の違いによって被害がどのように異なってくるか、何らかのハードおよびソフト対策を構じた結果それがどの程度有効であったかなどの問題にも対処しようものと思われる。各メッシュにインプットする情報を収集し、メッシュデータを作成することによりかなりの労力が要求されるが、ここで示した氾濫計算法とメッシュデータを総合した洪水氾濫危険度の定量化法とその予測精度はソフトおよびハード対策を構ずる場合に十分実用に供し得るものと思われ、今後このことについても早急に検討していくつもりである。

5. 結 語

以上、本研究においては、市街地家屋群中での洪水氾濫に関して実験と数値シミュレーションを行い、計算法の妥当性を検討した。さらに、本手法を巨椋流域に適用し、洪水災害危険度の評価を行った。以下、本研究で得られた主要な結果と問題点をまとめて結語とする。

- (1) 洪水氾濫現象に関する基礎方程式の誘導を行い、その差分式を示すとともに、家屋群が存在する場での氾濫計算手法を提示した。
- (2) 家屋群が存在する場での洪水氾濫実験を行い、提案した数値計算手法である程度実験結果が説明される

ことが確かめられた。しかしながら、メッシュの平均的な通過率だけでは、街路や空地などで形成される流路によって卓越した流れが生じることを表現できないので、さらに改良する必要がある。

- (3) 巨椋流域にここで提案した氾濫シミュレーション法を適用し、計算条件を種々変化させて家屋の流失危険度および湛水深の分布を計算し、流域の洪水災害危険度を評価した。その結果、家屋群を考慮した場合と考慮しない場合とではかなり結果が異なり、後者の場合かなり危険度を大きく見積る可能性があることがわかった。さらに、前者の場合、家屋の流失が下流側の家屋に二次的な被害を与える計算もある程度可能ことが判明した。ついで、洪水災害危険度評価に対する二次元氾濫計算法の有用性を検討した。

最後に、本研究の一部に文部省科学研究費（奨励研究(A)研究代表者、中川 一 課題番号60750483）の補助を受けた。計算には京都大学大型計算機センターのシステムを利用した。関係各位に記して深謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗, 井上和也: 氾濫原における洪水の挙動の解析, 第21回自然災害シンポジウム講演要旨集, 1984, pp. 343-346.
- 2) Xanthopoulos, T and C. Koutitas: Numerical Simulation of a Two Dimensional Flood Wave Propagation due to Dam Failure, Jour. Hydraulic Research, Vol. 14, No. 2, 1976, pp. 321-331.
- 3) 相田 勇: 陸上に溢れる津波の数値実験——高知県須崎および宇佐の場合——, 東大地震研究所集報, 第52号, 1977, pp. 441-460.
- 4) 中川 一・高橋 保: 堤防の決壊による市街地の洪水氾濫に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第40回, 1985, pp. 113-114.
- 5) 後藤智明・首藤伸夫・笹川稔郎: 陸上大障害物群の津波氾濫時における抵抗, 水理講演会論文集, 第25回, 1981, pp. 125-132.
- 6) 大矢雅彦: 京都大学防災研究所防災資料センター災害史研究会講演資料, 1986.
- 7) 巨椋池土地改良区発行: 巨椋池干拓誌, 1981, pp. 149-160.
- 8) 7)に同じ.
- 9) 高橋 保・中川 一・加納茂紀: 洪水氾濫による木造家屋流失の危険度評価, 京大防災研年報, 第28号B-2, 1985, pp. 455-470.
- 10) 9)に同じ.
- 11) 河田恵昭・中川 一: 三隅川の洪水災害——洪水氾濫と家屋の被害——, 京大防災研年報, 第27号B-2, 1984, pp. 179-196.
- 12) 3)に同じ.
- 13) 村上仁士・島田富美男・細井由彦・見附敬三: 徳島県浅川に遡上した1946年南海地震津波の挙動とその危険度の評価に関する研究, 自然災害科学, Vol. 4, No. 2, 1985, pp. 12-26.
- 14) 建設省河川局河川計画課: 治水経済調査要綱, 1984.