

河道特性と市街地構造を考慮した 越水・破堤氾濫シミュレーション

NUMERICAL SIMULATIONS OF URBAN FLOODING DUE TO DIKE BREACHING

秋山 壽一郎¹・重枝 未玲²

Juichiro AKIYAMA and Mirei SHIGE-EDA

¹フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒 804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

²正会員 博士(工) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (同上)

The flooding process of the Misumi district due to dike breaking of the Misumi River, occurred in July 1983, is simulated by a two-dimensional numerical model for urban flooding. The model employs the finite volume method on unstructured grid using flux-difference splitting (FDS) technique. Such characteristics of the flood plain as submerged/emerged topography, density and arrangement of buildings and houses, streets, flood retarding plantation as well as the characteristics of the river are considered in the simulations. It is shown that the model is capable of reproducing the complex inundation process in an urban area and hydrodynamic forces on buildings and houses with reasonable accuracy.

Key Words : urban flooding, dike breaking, numerical simulation, unstructured grid system, finite-volume method, flux difference splitting

1. はじめに

近年, 集中豪雨による浸水災害が頻発し, 甚大な被害が発生している. 最近では観測史上最大あるいはそれに近いような集中豪雨も稀ではなく, 低平地に発達していることが多い我が国の都市域では, 豪雨災害のポテンシャルが著しく増大している. このような状況にあって, 2000年9月東海豪雨災害では新川で, 2004年7月の新潟豪雨災害では五十嵐川・刈谷田川で, 福井豪雨災害では足羽川で破堤氾濫が発生した.

都市域には, 地形起伏・中小河川・田畑・樹林帯などの氾濫原の特性のみならず, 家屋やビル等の構造物群・道路網・公園などの市街地構造や, 鉄道・水路・下水道などの都市の特性が存在しているが, 市街地での氾濫水は街路や駐車場などに集中するなど, 市街地構造の影響を強く受けることが知られている^{1),2)}. 特に, 人口や家屋等が密集する市街地での破堤氾濫は, 人命の損失や家屋の流出・損壊等を含む甚大な被害をもたらすことから, ハザードマップの作成においては浸水深のみならず, 市街地構造を考慮した流速や流向, 流体力などのより詳細な情報が求められる.

市街地を対象とした氾濫解析モデルとしては, 例えば,

末次・栗城³⁾, 福岡ら⁴⁾, 川池ら⁵⁾, 重枝・秋山⁶⁾のモデルなどがある. これらはいずれも浅水流方程式を独自の方法で離散化した平面2次元不定流モデルに, 市街地構造を含む氾濫原特性の取り扱いを組み込むことで構築されている. 末次・栗城³⁾は, 土地利用に応じた等価粗度係数または建物占有率や浸水深の関数としての合成粗度係数により, 構造物や道路網等の影響を考慮している. 川池ら⁵⁾は, 一般曲線座標や非構造格子を用いることで, 市街地構造の構成要素である道路網を表現するとともに, 等価粗度係数として構造物等の影響を考慮している. 福岡ら⁴⁾は, 家屋等の構造物に作用する流体力項を基礎方程式に付加し, 一般曲線座標系に基づき道路網を表現することで, 道路網と構造物の配置を取扱えるモデルを開発している. 著者らは, 有限体積法・非構造格子・FDSに基づく2次元不定流モデルであるSA-FUF-2DF(Spatial Averaged Finite-volume method on Unstructured grid using Flux-difference splitting technique for 2D Flood flows)モデル⁷⁾に, 種々の市街地構造構成要素の取り扱いを組み込んだダイナミック都市域氾濫解析モデル(以下, 本ダイナミックモデルという)を開発し, 家屋群⁸⁾, 樹林帯⁹⁾, 流れの状態により水没・非水没状態となる地形起伏¹⁰⁾などの各市街地構造に関する検証, およ

表-1 実スケール市街地の計算に用いた境界条件

適用場所	条件
構造物の境界	閉境界条件
三隅川の流入条件	流量ハイドログラフ
三隅川の下流端	自由流出条件
三隅川左岸・右岸上流	本間の越流公式

び構造物群・樹林帯・水没/非水没となる地形起伏が混在するようなモデル市街地に関する総合的な検証⁶⁾を通じその基本性能を明らかにしている。さらに、2003年7月九州豪雨災害時に遠賀川流域で最大の被害となった飯塚市を含む都市域を取り上げ、本ダイナミックモデルがそこでの内水氾濫プロセスの再現や本川の河道改修効果等を検討する上で有効なツールであることを示している¹¹⁾。

一方、破堤氾濫を対象とした氾濫解析モデルとしては、例えば、高橋・中川¹²⁾、辻本¹³⁾、川口¹⁴⁾、著者ら^{7),8)}のモデルなどがある。高橋・中川¹²⁾は、市街地における破堤氾濫の挙動について、実験と数値解析の両面から検討を加えている。辻本¹³⁾は、河道・堤防・堤内地を一体的に取り扱い、破堤プロセスを考慮した氾濫解析を試み、五十嵐川・刈谷田川への適用を行っている。川口¹⁴⁾は、著者らと同様にFDSに基づく平面2次元モデルにより、刈谷田川での洪水・破堤氾濫解析を行い、中之島地区での氾濫流の挙動や家屋流失について検討を加えている。

本研究は、近年の集中豪雨の激化傾向を踏まえ、やや古い事例ではあるが、河田・中川²⁾によって被災の状況等がかなり詳しく把握されている1983年7月山陰豪雨災害を取り上げ、河川の増水による霞堤からの洪水の流入から越流氾濫を経て、破堤氾濫に至るまでの浸水プロセスのシミュレーションや流体力の評価を通じ、堤外地の特性と堤内地の市街地構造を含む氾濫原や都市の特性を包括的に取扱える本ダイナミックモデルの有用性を実証したものである。

2. モデルの概要

本ダイナミックモデルは、河道特性や市街地構造を含む氾濫原特性、下水道等の雨水排除システムなどを考慮した上で、内水氾濫および破堤氾濫を含む外水氾濫を同時に取扱える基本性能を有している。特に、氾濫の主因となる河道(本川,支川)での洪水流と氾濫原での氾濫流を区別せず、包括的に平面2次元モデルとして取扱うため、越流公式を用いることなく、堤内地と堤外地との間での雨水のやり取りを評価できる。このため、越流公式が適用できないような状況、例えば、

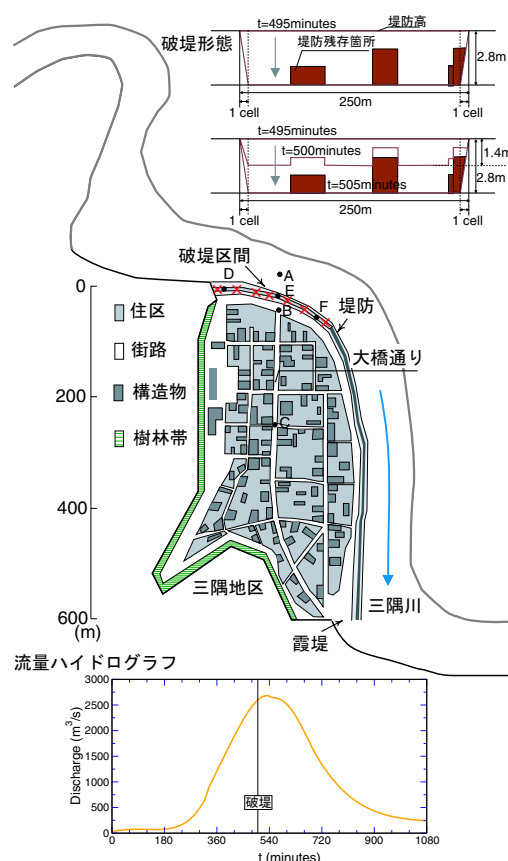


図-1 市街地構造、流量ハイドログラフおよび破堤形態

築堤河道や掘り込み河道からの潜り溢水や越流、あるいはその逆の堤内地から河道への流入等を考慮した解析が可能であり、さらに、低平地での流出解析法としても有効なものである。本ダイナミックモデルの詳細については、参考文献^{7),15),8),9),10),11),16)}を参照されたい。なお、本シミュレーションでは、河道特性と市街地構造に加え、氾濫原特性として地形起伏と樹林帯が考慮されている。

3. 三隅川の越水・破堤氾濫への適用

1983年7月山陰豪雨災害では、三隅川に隣接して市街地が発達した三隅地区では、7月23日の真夜中からはじまった増水により霞堤からの洪水の流入から越流氾濫の後に、7月23日の午前8時~8時30分頃に三隅川右岸で破堤氾濫が発生した。氾濫水が街路や駐車場などに集中した結果、破堤区間付近に止まらず、街路に沿った木造家屋などが流出・全壊する甚大な被害となった²⁾。

シミュレーションは、図-1に示す三隅地区を対象に行った。街路網や家屋等の構造物の配置状況および河床高・地盤高は、河田・中川²⁾に基づき作成した。ただし、家屋の配置については、主要なもののみを考慮した。河道の粗度係数については河田・中川と同様に $n=0.04$ を、街路・住区については一般的に用いられ

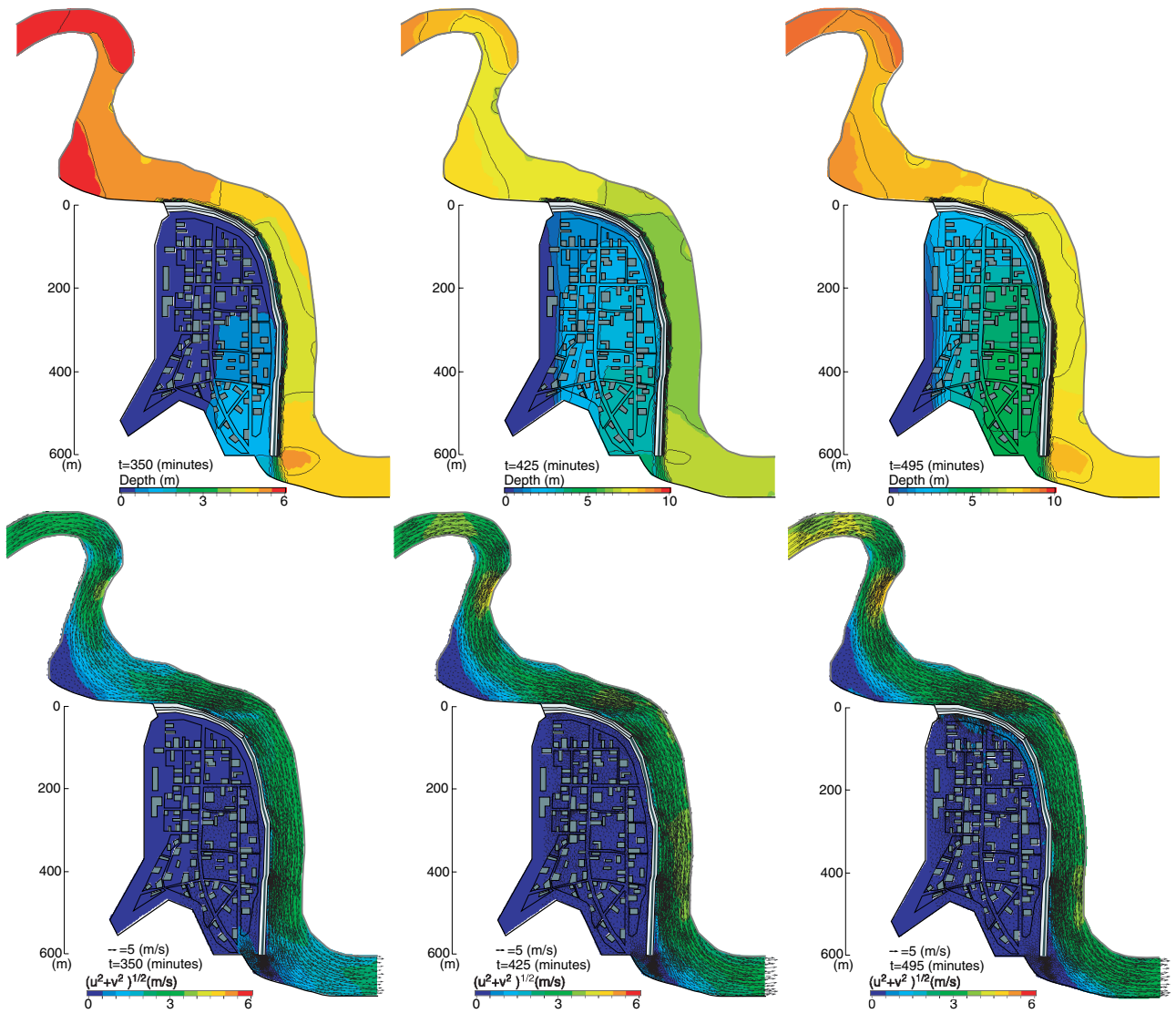


図-2 河道での水深と市街地での浸水深コンター(上), 河道および市街地での流速ベクトルの計算結果(下)($t=350$ 分(左), $t=425$ 分(中), $t=495$ 分(右))

る値(街路: $n=0.043$, 住区: $n=0.067$)を用いた。また、樹林帯の植生密度 a および抵抗係数 C_d は 0.08 および 1.2 を与え, x 方向, y 方向の流体力をそれぞれ $F_x = C_d \cdot a / 2 \cdot u h \sqrt{u^2 + v^2}$, $F_y = C_d \cdot a / 2 \cdot v h \sqrt{u^2 + v^2}$ のように計算した。三隅川のハイドログラフは, 角屋ら¹⁷⁾により得られた図-1 を与えた。河道内の流れの初期条件は, この流量ハイドログラフの $t=0$ 分に対応する流量に対して得られた水深 h , x 方向流速 u と y 方向流速 v の定常解とした。一方, 氾濫原の初期条件としては, 水深 $h_v=0.01\text{m}$, 流速 $u=v=0$ を与えた¹¹⁾。境界条件としては, 表-1 に示す条件を与えた。河道と市街地との水のやり取りと関係のない三隅川の左岸と右岸上流(図-1)では, 河道内の水位が上昇し堤防高より高くなった時点で本間の越流公式で越流させた。

シミュレーションの条件は, 越流氾濫(Case1), 越流氾濫から漸次破堤氾濫(Case2), 越流氾濫から瞬間破堤氾濫(Case3)の3通りに設定した。不明な点は残さ

れているものの, Case2 が現地の状況に対応していると考えられている。破堤区間と形状については, 河田・中川²⁾の報告を踏まえ, 図-1 のように設定した。破堤開始時間は, 破堤が起こったと思われる 8:15AM に対応する $t=495$ 分とした。破堤形態については不明な点が多いとの報告がなされているので, 図-1 に示すように, Case2 では所用時間 10 分で時間とともに堤防高を下げることで最終的な破堤形状まで変化させ, Case3 では瞬間的に最終的な破堤形状まで変化させた。同図において, 茶色の部分は, 破堤の後に堤防の残存が確認された箇所であり, 茶色の実線は堤防高を表している。図-2 は, 越流前($t=350$ 分), 越流が開始する時刻($t=425$ 分, 実時間で 7:00AM 頃に対応)および破堤直前の時刻($t=495$ 分, 8:15AM 頃)での河道水深と市街地浸水深のコンター, 河道と市街地での流速ベクトルを示したものである(Case1~Case3 共通)。破堤の開始時刻は, 図-1 に示したとおりである。これより, (1) 河道での

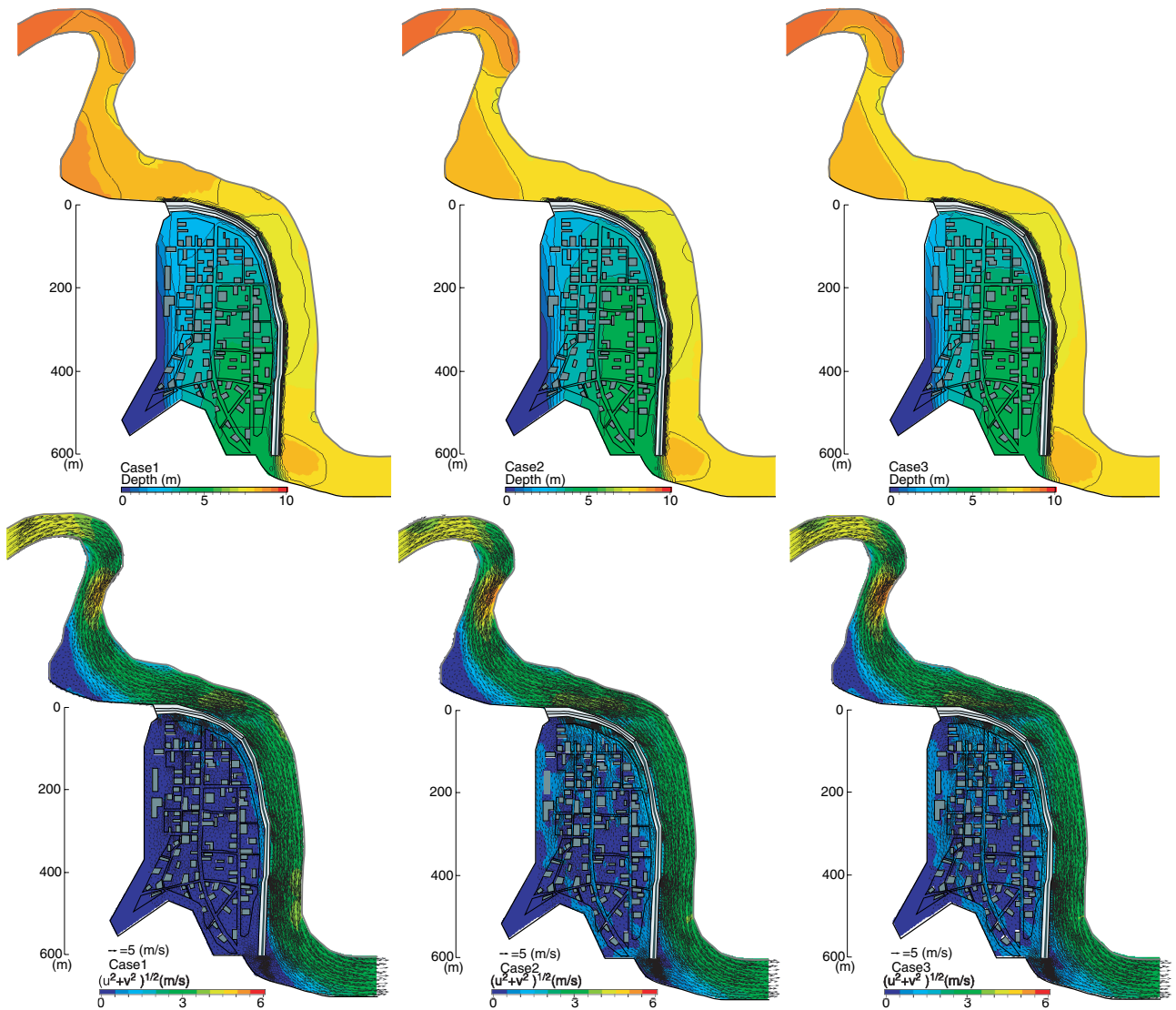


図-3 河道での水深と市街地での浸水深コンター（上），河道および市街地での流速ベクトルの計算結果の比較（下）（破堤 5 分後（ $t=500$ 分），Case1：越流氾濫（左），Case2：漸次破堤氾濫（中），Case3：瞬間破堤氾濫（右））

増水により $t=350$ 分（5:30AM 頃）に下流端付近の霞堤から洪水流が流入し始め、堤内地の浸水域が拡大し、地盤高の低いところで浸水深が大きくなっていくこと、(2) $t=425$ 分（7:00AM 頃）に破堤区間から越流が始まり、破堤直前の $t=495$ 分には越流が激しくなっていること、などが確認できる。三隅川の平面形状から、破堤区間が水衝部となっており、その下流では川幅が狭まっているため、破堤区間で流下能力が低下していることは容易に予想できるが、本シミュレーションはこのような河道特性の故に、越流が激しくなった区間で堤防の決壊に至ったことを明確に示している。なお、本シミュレーションでは、破堤直前の $t=495$ 分での破堤区間付近の堤内地の水深は 2.4m 程度であり、三隅川の下流付近での堤内地の水深は 5m 程度であった。河田・中川²⁾によれば、前者は 3m 前後、後者は 5m 程度であったと報告されており、いずれもほぼ一致している。

図-3 は、破堤した時刻から 5 分後の Case1 ~ Case3

の河道と市街地での水深および流速ベクトルを示したものである。これより、(1) 破堤区間付近で大きな流速が生じており、Case1 に比べ Case2 と Case3 が大きく、Case3 で最も大きくなっていること、(2) 氾濫水が市街地を貫通する大橋通りを主とした街路や、点在する空き地等のオープンスペースに集中して市街地に広がっていったこと、(3) 河道の洪水流の主流線に沿った堤内地（破堤区間下流の河道に沿ったところ）で水深、流速ともに大きくなっていること、などが確認できる。

図-4 は、破堤区間天端上の位置 D ~ F での越流水深と越流流速の経時変化を示したものである。これより、(1) 位置 D で最も早く越流が開始し、越流流速もそこで最も大きくなっていること、(2) 河道幅が最も狭くなる位置 E で越流水深が最大となっていること、(3) 位置 F では、破堤時の越流流速が位置 E と同程度となっていること、などが確認できる。これらのことから、堤防の決壊プロセスとしては、破堤区間の上流から下流

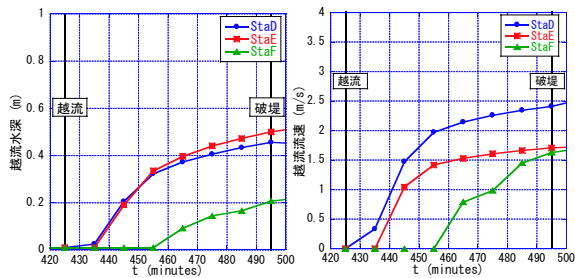


図-4 破堤区間天端での越流水深と越流流速

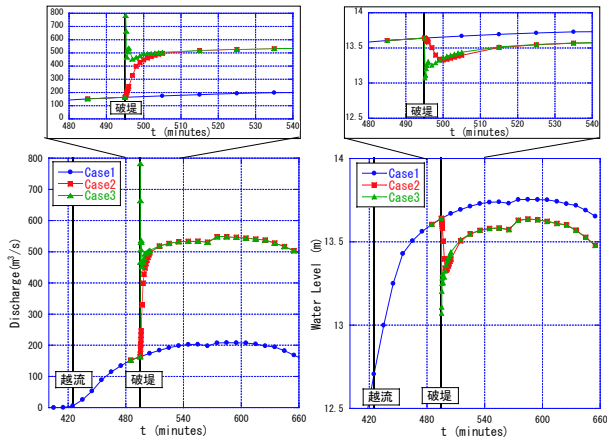


図-5 破堤区間からの流入ハイドログラフと位置 A での河道内水位の経時変化

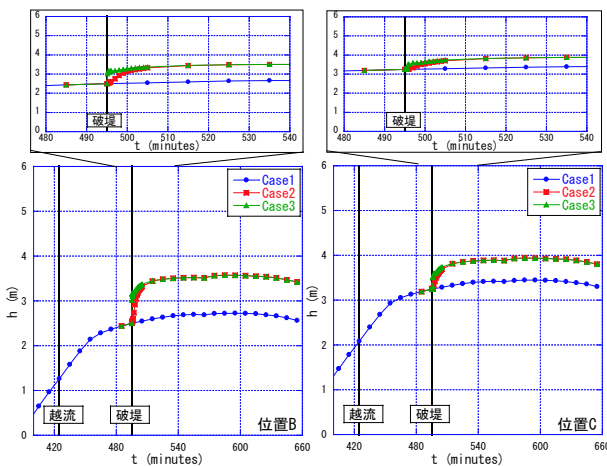


図-6 位置 B と C での浸水深の経時変化

に向かって進行していったと推定される。また、堤防の構造や強度等にもよるが、ある一定以上の越流水深と越流流速が一定時間以上継続した場合に、破堤に至る可能性があることも示唆されている。この点については、他の越流破堤氾濫の事例も踏まえながら、今後、より定量的に検討していきたいと考えている。

図-5 は、破堤区間からの流入流量ハイドログラフと破堤区間付近の位置 A での河道内水位 (図-1) との関係を示したものである。これより、(1) Case2 と Case3 では破堤後に流入流量の急増が見られ、同時に位置 A での河道内水位が急減していること、(2) Case3, Case2, Case1 の順で流入流量が大きくなっており、Case2 と Case3 では破堤開始から 10 分程度までは Case3 の流入

流量が大きくなるものの、それ以降では破堤形状が同じになるために差が生じないこと、などが確認できる。これらのことから、破堤の有無のみならず、破堤に要する時間も破堤区間での流入流量に大きな影響を与え、これが破堤区間付近での氾濫流の流速や浸水深を規定していることがわかる。図-6 は、流れの集中が顕著であった大橋通りの位置 B と位置 C での水深の経時変化を示したものである。これより、破堤区間から遠ざかるにつれて、Case2 と Case3 の違いがなくなっていくことから、破堤形態の違いが氾濫流の挙動に及ぼす影響は、破堤区間近傍に限定されることが確認できる。

図-7 は、最大流体力の (U^2h) のコンター図を示したものである。ここで、 $U = (u^2 + v^2)^{1/2}$ である。図中の黒丸と白丸は、河田・中川²⁾の報告に基づき、流失家屋と全壊家屋を区別して示したものである。なお、灰色で示した家屋については、先述したように主要なもののみを考慮して配置しているため、必ずしも黒丸と白丸とは一致していない。また、全壊家屋については、1 階天井まで水没したために強制的に撤去された家屋も含まれており、必ずしも倒壊による全壊ではない。実際の被災では流木や倒壊家屋からの建材等の堆積あるいは家屋の流失によって氾濫流の挙動が変化し、家屋に働く流体力が増減したり、流出家屋の他の家屋への衝突によって被災が生じているが、本解析ではこれらのことは考慮していない。

以上のことを勘案した上で、流体力のコンター図を見てみると、(1) 水衝部と河道の洪水流の主流線に沿った堤内地 (破堤区間下流の河道に沿ったところ) では、最大流体力が大きく、越流氾濫であっても家屋流出の可能性があること、(2) 破堤区間付近、道路に沿った堤内地、洪水流の主流線に沿った堤内地では、最大流体力が大きくなっており、家屋流失がそこに集中していること、(3) 破堤区間付近の堤内地を除き、最大流体力に大きな違いが認められないことから、破堤形態の影響は破堤区間付近に限定されること、(4) 破堤区間付近では、瞬間破堤の最大流体力が漸次破堤よりも、最大で 7 倍程度大きくなっていったことから、破堤形態は破堤区間付近での被害の程度に大きな影響を及ぼすと考えられること、(5) 破堤区間付近での最大流体力と家屋流失状況から、破堤区間上流側では瞬間破堤に近い状態で決壊したと推察されること、などが確認あるいは推察できる。なお、河道と道路に挟まれた堤内地と道路沿いに多数の全壊家屋が存在しているのは、そこでの浸水深 (図-3) が 3~5 m と大きかったためであると考えられる。

4. おわりに

本研究では、堤外地と堤内地の特性を包括的に取扱うことができるダイナミック氾濫解析モデルを 1983 年

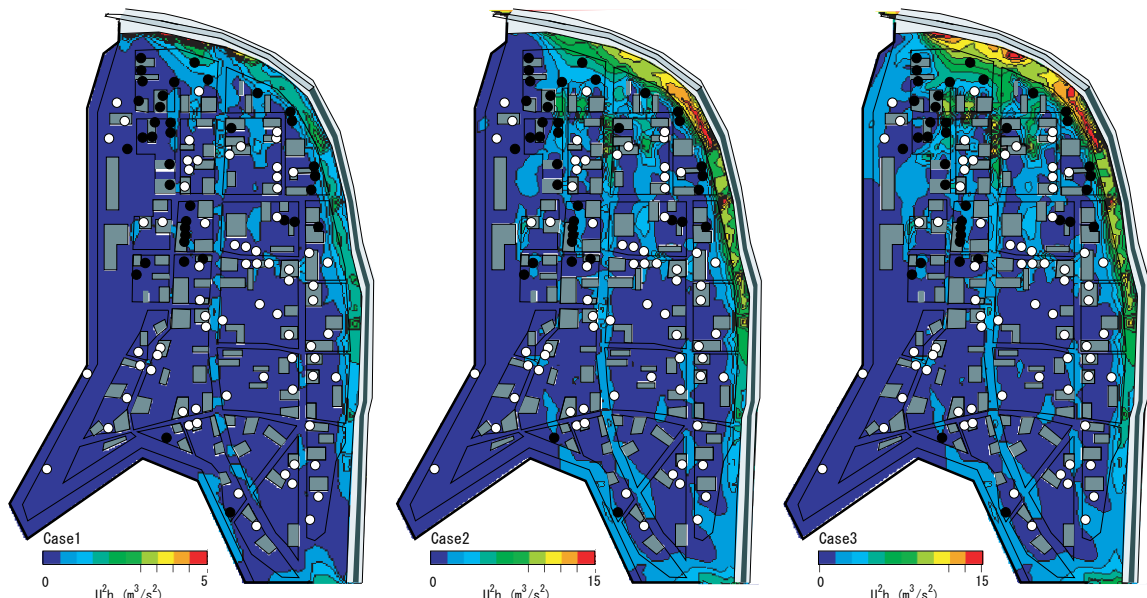


図-7 最大流体力カウンター図 (図中の \bullet は流出家屋, \circ は全壊家屋を表している) . Case1: 越流氾濫 (左), Case2: 漸次破堤氾濫 (中), Case3: 瞬間破堤氾濫 (右)

7月山陰豪雨災害時の三隅地区に適用し、増水による霞堤からの洪水の流入から越流氾濫を経て、破堤氾濫に至る浸水プロセスや流体力の評価を通じ、その有効性を実証した。より具体的には、(1) 越流、漸次破堤および瞬間破堤では、構造物に作用する流体力が大きく異なってくることから、異常外力に対する堤防の耐力、つまり堤防のねばり強さが被害軽減において重要であること、(2) 本ダイナミックモデルは、破堤氾濫を含む浸水被害を最小限に止めるような氾濫原管理や河道特性を考慮した市街地計画を検討可能なツールであること、(3) 河道特性等との関係において、ある一定以上の越流水深と越流流速が一定時間以上継続した場合に、破堤に至る可能性があること、などの知見や示唆を得た。特に、(3) については、他の越流破堤氾濫の事例も踏まえながら、今後、より定量的な検討を加えて行きたいと考えている。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金基盤研究B（課題番号：17360237、研究代表者：秋山壽一郎）の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋保, 大久保賢治, 中川一: 昭和57年長崎豪雨における中島川の洪水氾濫解析, 京都大学防災研究所年報, 第26号B-2, pp. 109-126, 1983.
- 2) 河田恵昭, 中川一: 三隅川の洪水被害-洪水氾濫と家屋の被害-, 京都大学防災研究所年報, Vol. 27 B-2, pp. 1-18, 1984.
- 3) 末次忠司, 栗城愷: 改良した氾濫モデルによる氾濫流の再現と防災への応用に関する研究, 土木学会論文集, No. 593/II-44, pp. 41-50, 1998.
- 4) 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教: 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究, 土木学会論文集, No. 600/II-44, pp. 23-36, 1998.

- 5) 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.
- 6) 重枝未玲, 秋山壽一郎: 市街地構造を考慮した氾濫解析モデルの総合的な検証, 水工学論文集, 第48巻, pp. 577-582, 2004.
- 7) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 浦勝: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく1次および2次精度平面2次元洪水流数値モデル, 土木学会論文集, No. 705/II-59, pp. 31-43, 2002.
- 8) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 浦勝, 小林俊彦: 洪水氾濫流と構造物に働く流体力の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第46巻, pp. 833-838, 2002.
- 9) 重枝未玲, 秋山壽一郎: 数値シミュレーションに基づく堤防に沿った樹林帯の治水機能の検討, 土木学会論文集, No. 740/II-64, pp. 19-30, 2003.
- 10) 重枝未玲, 秋山壽一郎: 複雑な地形起伏を有する場における氾濫流の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第47巻, pp. 871-876, 2003.
- 11) 秋山壽一郎, 重枝未玲: 飯塚市を中心とした都市域のダイナミック氾濫解析~2003年7月遠賀川豪雨災害を対象として~, 水工学論文集, 第49巻, pp. 619-624, 2005.
- 12) 高橋保, 中川一: 堤防決壊による洪水危険度の評価に関する研究, 京大防災研究所年報, 第29号B-2, pp. 431-450, 1986.
- 13) 辻本哲郎, 鷲見哲也, 寺本敦子, 前田和: 破堤拡大過程と河川特性の関係について, 河川技術論文集, 第11巻, pp. 121-126, 2005.
- 14) 川口広司, 末次忠司, 福留康智: 2004年7月新潟県刈谷田川洪水・破堤氾濫に関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp. 577-582, 2005.
- 15) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 浦勝, 有田由高: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面2次元洪水流数値モデル, 水工学論文集, 第45巻, pp. 895-900, 2001.
- 16) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 鬼束幸樹, 白川寛樹: 平面2次元数値モデルによる急流都市河川の流況解析, 水工学論文集, 第48巻, pp. 631-636, 2004.
- 17) 角屋睦, 岡太郎, 増本隆夫, 田中礼次郎, 今尾昭夫: 島根西部河川の洪水流出特性, 文部省科学研究費突発災害調査報告, 昭和58年7月山陰豪雨災害の調査研究, 1984.

(2005. 9. 30 受付)