

2004年10月出石川破堤氾濫における洪水の被害 調査と氾濫流解析に基づく検討

FLOOD DAMAGE DUE TO DYKE BREAK IN IZUSHIGAWA RIVER IN 2004
BASED ON QUESTIONNAIRE AND NUMERICAL SIMULATION

内田龍彦¹・見上哲章²・河原能久³・湧川勝己⁴, 幸弘美²

Tatsuhiko UCHIDA, Tetsuaki MIKAMI, Yoshihisa KAWAHARA, Katsumi WAKIGAWA
and Hiromi YUKI

¹正会員 博(工) 広島大学大学院助教 工学研究科社会環境システム専攻(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

²正会員 株式会社東京建設コンサルタント(〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

³フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻(同上)

⁴正会員 財団法人国土技術研究センター(〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

Recently, we have been severely damaged by dyke breaks of rivers due to typhoons or local heavy rains. In order to evaluate the flood damage by dyke breaks, it is important to consider flood flow and sediment transport at the same time especially for steep rivers that carry much suspended sediment. We develop a numerical method for flow and sediment transport on flood plains, which employs an explicit and conservative CIP scheme based on the control volume approach to directly capture the various conditions on the flood plains. The numerical method is applied to the actual dyke break occurred in October 2004 in Izushigawa River. The method is validated through the comparison between the numerical results and questionnaire results for house damages.

Key Words : *dyke break, sediment transport, CIP-CSL2 scheme, boundary condition, shallow-water flow, numerical analysis*

1. 序論

近年, 日本各地において豪雨が多発し, 中小河川を中心として堤防が決壊し, 甚大な被害をもたらしている。特に, 平成16年には梅雨前線の停滞による新潟・福島豪雨, 福井豪雨や相次ぐ台風の上陸によって日本各地において甚大な被害を受け, 世間の水災害に関する関心が高まった。翌年の平成17年にも, 記録的な豪雨に見舞われ, 宮崎水害等の被害が発生した。日本は地球温暖化の進行につれて豪雨がさらに増加するとの報告もあり, 今後の豪雨対策をどのように行うかが議論されている¹⁾。洪水氾濫被害を軽減するためには, 堤防や遊水地あるいは調節池等のハード対策と, 洪水ハザードマップや洪水時の効果的な避難体制等のソフト対策の連携をより一層強めて行くことが望まれている。現状の治水施設が対応できる規模を越える洪水に対しては, ソフト対策の重要性が増すと言え, 氾濫流を高精度で再現でき, 破堤氾濫の被害予測等が行える氾濫解析法の構築が求められる。

破堤氾濫の被害, 特に家屋被害を検討するためには, 氾濫域の地盤の起伏と道路等の土地利用および建物群等

が氾濫流に与える影響を取り込み, 氾濫流の挙動を高精度に解析することが重要となる。末次ら²⁾は等価粗度係数を用いて建物群を含めた氾濫流の抵抗を評価している。福岡ら³⁾は, 家屋等の建物群に作用する流体力項を基礎方程式に付加し, 一般曲線座標系を用いて道路網を評価している。井上ら⁴⁾は, 非構造格子を用いることで氾濫流に影響を与える様々な要因を考慮することを可能とした。しかし, これらは広域の氾濫流を対象としており, 家屋被害の検討はなされていない。重枝ら⁵⁾は, 非構造格子とFDSを用い, 破堤部付近の詳細な氾濫流の挙動と建物群に作用する流体力を計算できるモデルを開発している。川口ら⁶⁾は, 2004年7月の刈谷川の破堤氾濫流を対象として, FDSに基づく氾濫流解析により家屋の倒壊が氾濫流に及ぼす影響を検討している。大藪ら⁷⁾は, 本研究で対象とする出石川破堤氾濫流を対象として, 重枝ら⁵⁾と同様のモデルを用いて高解像度の氾濫流解析を行い, 流体力と家屋被害の関係を検討している。破堤氾濫による家屋の被害は, 一概に家屋に作用する流体力や浸水によるものだけではなく, 河川から流入する土砂及び堤防土砂などが氾濫流により流送され, 家屋内に堆積することによる被害も大きい。水害後の清掃・後片付けにおい

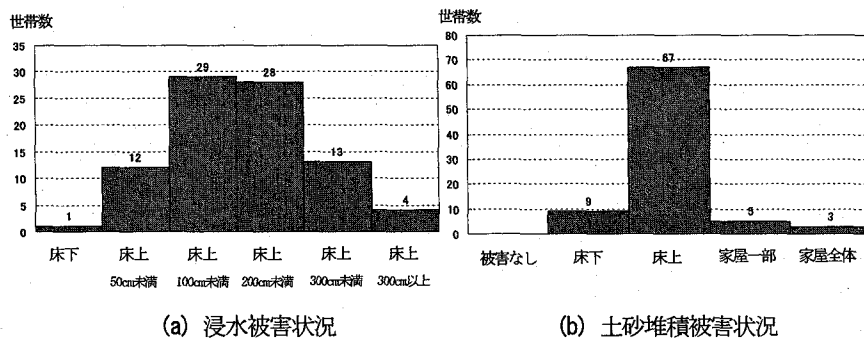
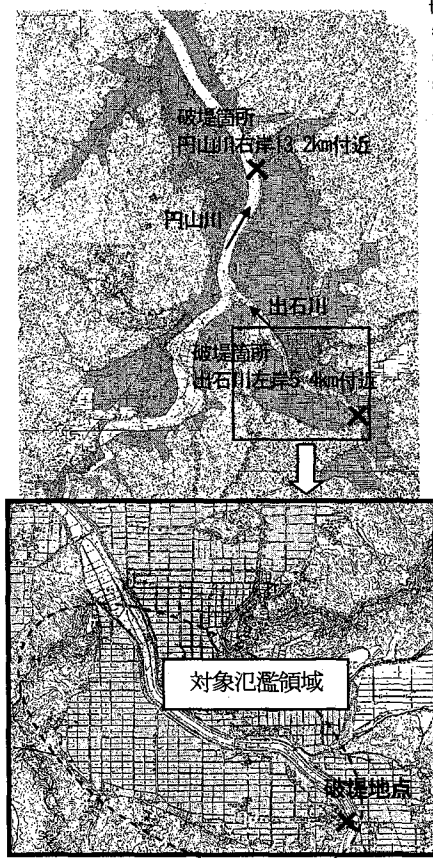


図-2 家屋の浸水被害と土砂堆積被害状況

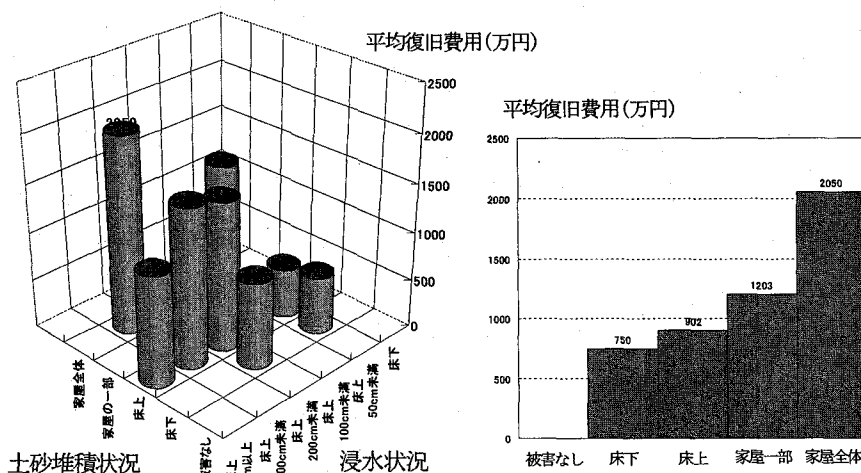


図-4 家屋の土砂堆積被害と
平均復旧費用

ては、家屋内に堆積した土砂を取り除く姿をマスメディア等で多く見受ける⁸⁾。また、土砂生産の多い河川流域では流出土砂の影響により氾濫規模が大きくなるという研究成果も報告されており⁹⁾、中小河川の破堤氾濫流の被害を検討する上で、氾濫流により流送される土砂が氾濫の被害に及ぼす影響は無視できないと考えられる。しかし、破堤部からの土砂流出及び低内地の土砂堆積を扱った研究はいくつか見られるが、土砂堆積が家屋被害に及ぼす影響を検討している研究は極めて少ない。近年では例えば、川池ら⁹⁾は、氾濫域への土砂輸送について山地部・河道を含め検討し、土砂動態を含んだ氾濫解析手法を構築しているが、土砂堆積と家屋被害の関係については検討が不十分である。

本研究では、平成16年10月の台風23号による出石川の氾濫を対象に、家屋浸水深や土砂堆積深および家屋の被災規模の現地調査を行うとともに、土砂動態を考慮した家屋被害を検討できる数値解析モデルを構築する。そして、氾濫流の挙動を分析することで被害がどのように拡大したかを明らかにすることを目的とする。

2. 2004年台風23号の出水と被害状況

(1) 円山川水害の概要

平成16年10月の台風23号は、10月20日の18時頃に近畿

地方に上陸し、円山川流域に豪雨をもたらした。出水状況は、円山川の基準地点立野上流において12、24時間雨量としては戦後最大、2日雨量においても戦後3位となる非常に大きな降雨をもたらした。流量としては過去最大であった伊勢湾台風時の洪水流量を越える最大のものとなった。円山川立野大橋付近及び出石川烏居橋付近において破堤氾濫が生じるとともに、沿川のいたる箇所でも越水氾濫や内水氾濫が生じ、円山川下流域圏全体で壊滅的な被害が発生した。

図-1に円山下流圏域の浸水区域図と本研究の対象氾濫領域を示す。対象とした氾濫原は、上記の出石川左岸で破堤氾濫した被害の大きい地域である。この地域の被害調査については、湧川ら¹⁰⁾のアンケート調査結果を用いるものとした。

(2) 家屋の被災状況

家屋・家財被害に関する湧川ら¹⁰⁾のアンケート調査項目には、浸水被害の他に土砂堆積被害やそれによる各世帯の復旧費用がある。この内、世帯の復旧費用については水害により受けた被害額と関係深く、被害額と考えてよい。図-2(a), (b)に、対象世帯の浸水深と土砂堆積の被害状況を示す。対象とした世帯数は90サンプルである。

図-2より、家屋の浸水深ランクをみると床上100cm以上の世帯が多く、土砂堆積被害についても床上以上の世

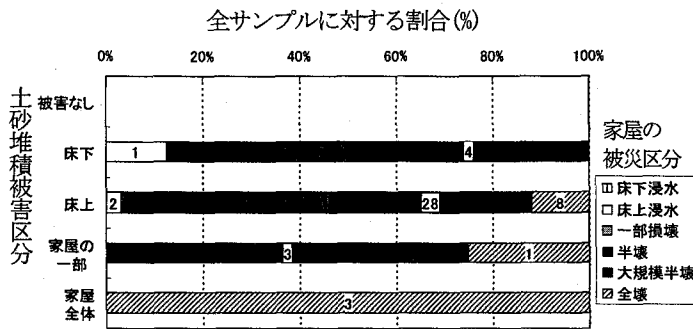


図-5 土砂堆積と家屋の被災区分の関係

帯が多く見受けられ、被害が大きかったことが伺える。これは、図-3に示す浸水被害と土砂堆積被害による平均復旧費用額の関係をみると明らかである。ここで、平均復旧費用額は浸水状況と土砂堆積状況に対応する各世帯の平均値である。なお、調査地域全体の復旧費用（被害額）は平均で980万円であった。また、この図-3において注目すべき点は、同じ浸水深においても土砂堆積被害が大きい世帯ほど復旧費用（被害額）は大きくなる傾向を示すことである。図-4に土砂堆積被害のランクごとの被害額を示す。図-4からも明らかなように、土砂堆積被害が大きい世帯ほど被害額も大きい。対象とした地域は、山地部と低平地の間に位置し、河川の土砂濃度も比較的大きく、破堤した氾濫流には多くの土砂を含んでいる。これによる土砂堆積の影響が世帯の被害に大きく関係した結果となっている。

次に、家屋の被災区分と土砂堆積の関係を図-5に示す。ここで、家屋の被災区分は、内閣府が災害後に調査する被害認定基準（案）に従って分類している。図-5より、被害額の関係と同様に土砂堆積が大きい世帯ほど家屋へのダメージも大きい。

以上のことから、土砂濃度の大きい河川流の氾濫被害を検討する場合には、浸水被害のみならず土砂被害も考慮する必要があると言える。また、土砂を含んだ被害は、水害後の後片付けや清掃等に多大な労力を要することからも土砂被害の重要性が伺える。3章では、対象地域において氾濫原への土砂動態を考慮した家屋被害を検討できる数値解析モデルを構築するとともに、氾濫流の挙動を分析することで被害がどのように拡大したかを検討する。

3. 出石川破堤氾濫解析

(1) 解析モデル

2章でまとめた2004年台風23号による出石川破堤氾濫流の再現計算を行い、その特徴について再検討する。家屋被害の検討を行うためには、家屋周辺の流れを表現できる高解像度の解析が必要となる。家屋形状等の複雑な境界形状は、しばしば境界適合座標系^{3),4),9)}を用いて表さ

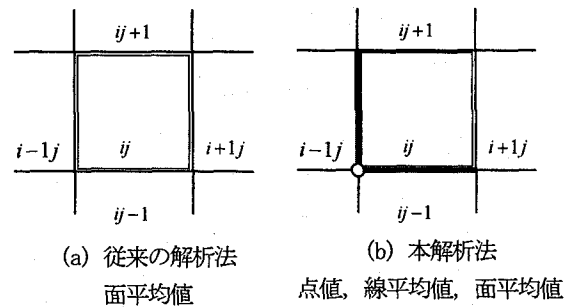


図-6 本解析モデルにおける計算格子がもつ情報

れるが、これらのモデルでは、建物群や道路網に合わせて計算格子を生成することが要求され、デカルト座標系モデルに比べて計算データの整備の負荷が格段に大きくなる。

著者ら^{11),12)}は、デカルト座標系でも氾濫域の複雑な地被情報を捉えることができる氾濫解析モデルを検討している。図-6に示すように本モデルではデカルト座標系で複雑な境界形状を表現するため、交点の値(点値、丸印)、 x, y 方向の格子一辺にわたる平均値(線平均値、太線の部分)、格子内にわたる平均値(面平均値、色を塗った箇所)において基礎方程式が連立して解かれる。これにより、基礎方程式の解法に内挿補間が必要とせず、流れの遷移部や、地盤高や道路網などのパラメータの分布を精度よく捉えることが可能となる。また、保存型CIP法を用いることでこれまでの水工学の分野で提案されているCIP法の課題¹²⁾についても改善されている。これらの詳細は文献^{11),12)}を参照にされたい。

一方、今回の災害では、図-3, 4, 5に示すように、流送土砂が家屋被害に与えた影響は大きいことから、浸水深だけでなく、土砂堆積を考慮する必要がある。そこで、中川らの土砂氾濫解析モデル¹³⁾を上述の著者らの解析法に導入する。以下に本解析モデルの概略を示す。

基礎方程式は土石流を連続として表現した連続式(1)と運動方程式(2)、土砂濃度の輸送方程式(3)、河床変動の式(4)から構成される^{9),13)}。本解析ではデカルト座標系において家屋等の境界形状を考慮するため、基礎方程式に計算格子の流体占有率が導入されている。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{V} \frac{\partial A_j u_j h}{\partial x_j} = i_B \quad (1)$$

$$\frac{1}{Vh} \left(V \frac{\partial u_i h}{\partial t} + \frac{\partial A_j u_i u_j h}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} - \frac{\tau_{oi}}{\rho_T h} + \frac{1}{Vh} \frac{\partial A_j h \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{1}{V} \frac{\partial A_j u_j Ch}{\partial x_j} = i_B C. \quad (3)$$

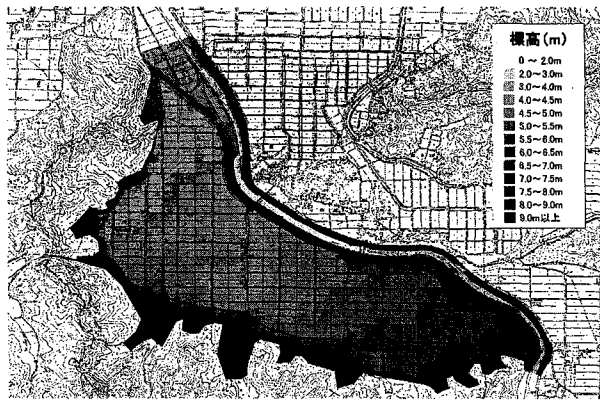


図-7 計算対象領域における標高データ

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i_b = 0 \quad (4)$$

ここに、添え字 ij は総和規約に従い、1,2はそれぞれ x,y 方向を表す。添え字 l,j と等しいが、総和規約には従わないものとする。また、 h は水深、 u_i は i 方向流速、 $\zeta=z+h$ (z :鉛直方向)であり、 A_i は i 方向断面と計算格子の流体占有率(空隙率)である。 τ_{ij} は水平せん断力であり、渦粘性係数はゼロ方程式モデル $\nu_t=1/6ku_*h$ にスマゴリンスキーモデルによるもの足して求めている。 τ_{0i} は i 方向底面せん断力項であり、家屋占有率に応じた合成粗度係数 $^2)$ を用いている。 ρ_t は土石流の密度、 i_{bt} は単位時間あたりの侵食量、 C は河床土砂の堆積濃度である。これらの土石流に関する諸量は川池ら⁹⁾と同様に計算する。

(2) 解析条件

2mメッシュのレーザプロファイラデータを用いて、評価点をもつ5mメッシュ(573×610)の詳細な地盤高データを作成した(図-7)。建物占有率と土地利用のメッシュデータを国土地理院の1/2500の地形図を用いて作成し、建物占有率から流体占有率を求め、粗度係数は土地利用に応じて与えた。計算領域は山地部を除いた出石川左岸側の破堤氾濫地域とし、それ以外には流体占有率にゼロを与えた。流体占有率がゼロ以外のメッシュを計算メッシュと設定し、その内の浸水域のみで計算が行われている。図-8に計算の対象領域と領域内の家屋占有率を示す。

図-9は出石川破堤点付近の一次元不定流解析結果による破堤地点の河道水位と氾濫流量を示す。氾濫流量は氾濫シミュレーション・マニュアル¹⁵⁾に従い、河道水位から本間の越流公式を用いて計算している。本研究では、破堤氾濫流の挙動を調べるために、破堤直前の20日21時から21日9時まで計算を行い、河川への排水は考慮していない。また、本研究では氾濫域の土砂動態を調べるため、出石川の土砂解析は行わず、簡易的に破堤部で流入土砂濃度 $C=0.05$ 、平均粒径 $d=1.0\text{mm}$ を与えて計算を行う。氾濫域では堆積はするが侵食はしないと、氾濫流量を保存させるため式(1)の右辺を無視して計算する。

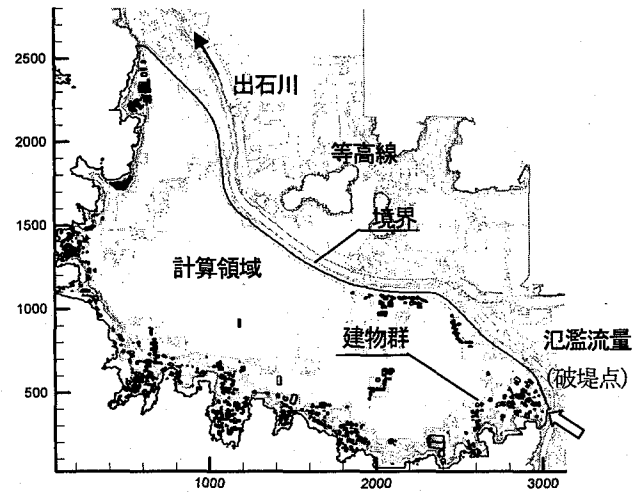


図-8 計算対象領域と家屋群占有率

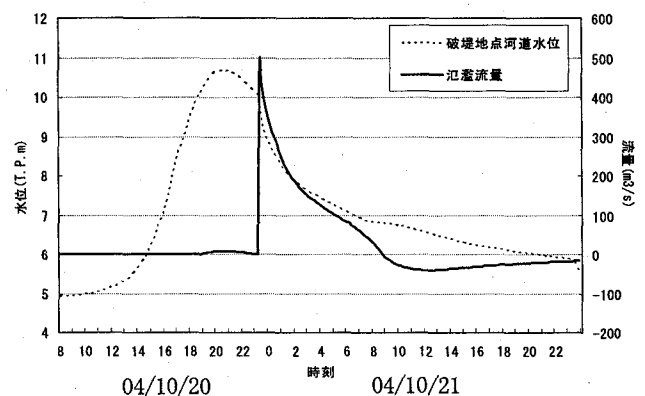
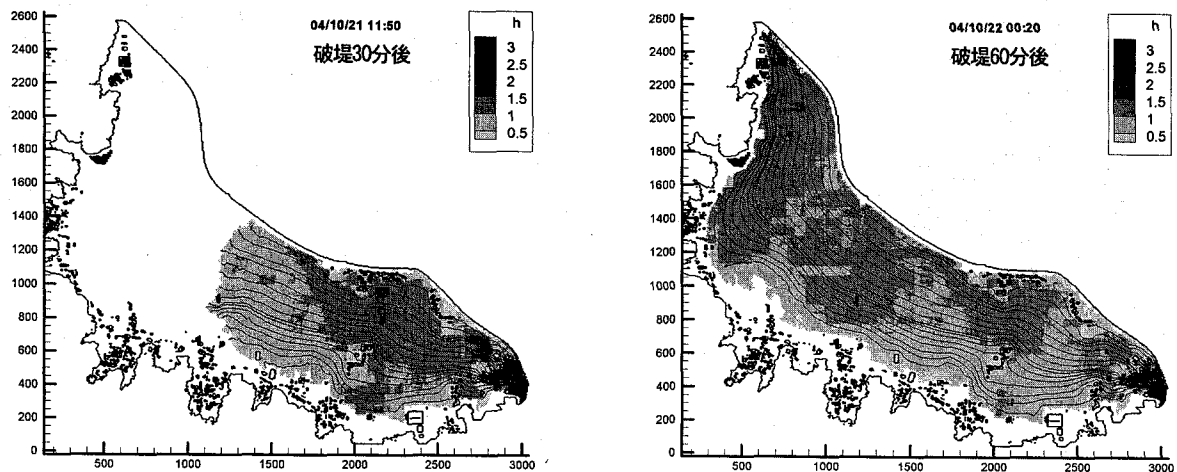


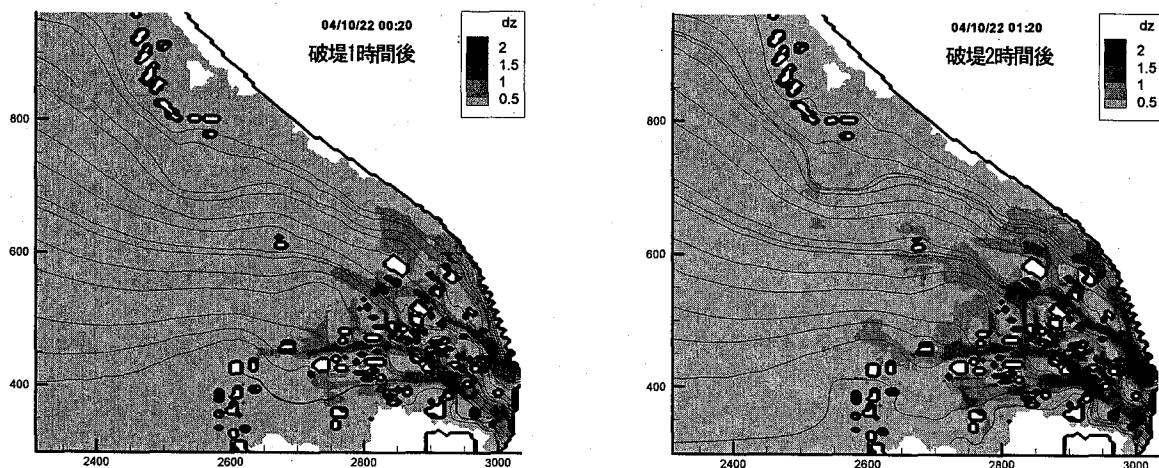
図-9 出石川破堤点付近の一次元不定流解析結果と氾濫流量

(3) 解析結果と考察

図-10に破堤直後の(a)氾濫水と(b)土砂の挙動を示す。図-10の曲線は流線を示す。(a)破堤部周辺では家屋が密集に配置されており、ここでの氾濫水は複雑な挙動をとるものの、氾濫領域全体的には河道と平行して下流へ伝播する。これは、氾濫領域が、全体的に地盤の起伏が少なく、河道に沿って長い形状をしていることと、破堤点とその上流端にあるためである。また、氾濫流量は氾濫領域に比べて極めて大きいことから、氾濫流の伝播は氾濫流量に支配される。このため、一般にはこのような現象の解析には高度な解析手法を導入する必要は無い。(b)一方、土砂は破堤部周辺で流れに沿って多量に堆積し、破堤点から離れた箇所では薄く広く堆積する。急勾配河川の高速流で生産された土砂を含む、破堤部から流入する高濃度の土砂流は、破堤点近傍で急激な流下断面の拡大により多くの土砂を堆積させ、土砂濃度を減少させながら流下する。破堤点から離れ、土砂濃度が氾濫域の流れに相当する程度まで小さくなると、流れの流下方向変化も小さくなることから、ほとんど土砂を堆積させることなく流下する。この結果、非常に薄い土砂堆積が氾濫水の伝播と共に広範囲に広がることとなる。このような箇所では氾濫水の収束域で土砂が堆積しやすい。今回の破堤氾濫においては、家屋群が密集していることから破



(a) 氾濫域における氾濫水の挙動



(b) 破堤部周辺の土砂動態

図-10 破堤直後の氾濫水の挙動と破堤部周辺の土砂動態

堤部付近の流れは特に複雑となり、土砂堆積の特徴を把握するためには、この流れを表現することが重要と言える。

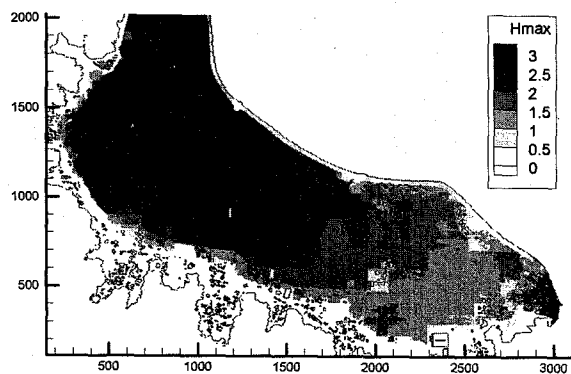
図-11に本解析結果による(a)最大浸水深、(b)最大土砂堆積深を、図-12にアンケート調査による各世帯の(a)浸水深、(b)土砂堆積を示す。最大浸水深は破堤点近傍と破堤点から離れた下流部で大きい。これは、氾濫領域全体は出石川の河川堤防と山地に囲まれているためである。解析結果とアンケート調査結果を比較すると、解析結果はアンケート調査結果の空間分布を概ね説明できている。最大土砂堆積深は破堤点から氾濫経路に沿って広がっている。出石川に沿って主要な土砂経路が出来ており、大きな土砂堆積域が鳥居団地に達している。アンケート調査結果では破堤点近傍と出石川沿いの家屋群で土砂の堆積が大きく、解析結果は妥当と言える。ただし、山裾に沿う住宅においても床上以上の堆積が報告されているが、本解析では山裾まで土砂が届いていない。破堤氾濫流による土砂堆積だとすると、水際近傍で死水域となって微細土砂が沈降したことが考えられるが、本解析では一様粒径しか取り扱っておらず、この点は今後の課

題である。

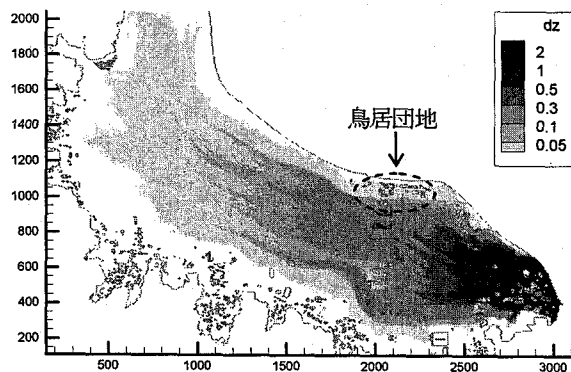
4. 結論

本研究では、平成16年10月の台風23号による出石川の氾濫を対象にして、家屋浸水深や土砂堆積深および家屋の被災規模を現地調査に基づいて検討した。そして、土砂氾濫流解析モデルを構築し、氾濫流の挙動を検討した。以下に本論文で得られた主要な結論を示す。

- 1) アンケート調査結果より、家屋被害額は浸水深だけでなく、土砂堆積深にも依存するため、土砂生産量の多い中小河川における破堤氾濫シミュレーションにおいては、土砂輸送を考慮することが重要であることを明らかにした。
- 2) デカルト座標系で氾濫域の情報を考慮できる土砂氾濫流解析モデルを構築し、詳細な地盤高データに基づく高解像度の土砂氾濫解析を行った。
- 3) 破堤氾濫流による土砂堆積は、破堤部周辺で主要な氾濫経路流れに沿って多量に堆積し、破堤点から離れた箇所では薄く広く堆積する。

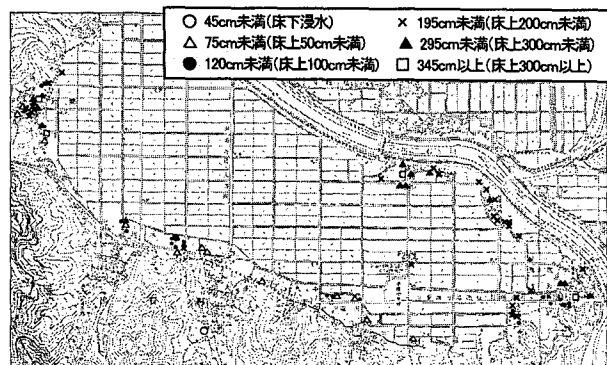


(a) 最大浸水深

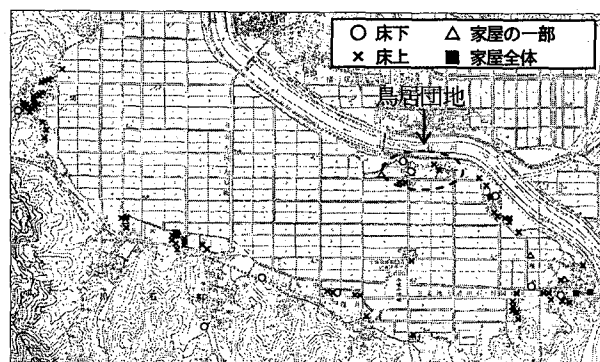


(b) 最大堆積深

図-11 解析結果による最大浸水深と最大堆積深



(a) 最大浸水深



(b) 最大堆積深

図-12 アンケート調査結果による最大浸水深と最大堆積状況

- 4) 解析モデル結果とアンケート調査結果を比較し、解析モデルがアンケート調査結果の土砂堆積被害を説明できることを示した。

参考文献

- 1) 例えば、辻本哲郎 編：豪雨・洪水災害の減災に向けて、技報堂出版、2006。
- 2) 末次忠司，栗城稔：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-43，pp.41-50，1998。
- 3) 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，pp.23-36，1998。
- 4) 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。
- 5) 重枝末玲，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。
- 6) 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・破堤氾濫流に関する研究，水工学論文集，第49巻，pp.577-582，2005。
- 7) 大藁政志，椿涼太，藤田一郎，川谷健：2004年10月出石川氾濫を対象とした現地調査に基づく高解像度氾濫解析，水工学論文集，第50巻，pp.685-670，2006。

- 8) 例えば，日経コンストラクション 編：水害の世紀，2005。
- 9) 川池健司，井上和也，戸田圭一，中井勤：流出土砂が急傾斜都市氾濫解析に及ぼす影響，水工学論文集，第45巻，pp.883-888，2001。
- 10) 湧川勝己，小林潔司，幸弘美，矢野定男，伊藤弘之：洪水氾濫による精神的被害及び流動性被害の研究—浸水被害実態の治水経済調査への反映を目指して—，河川技術論文集，第13巻，印刷中。
- 11) 内田龍彦，河原能久：任意の境界形状を有する二次元浅水流の高精度解析手法の開発，水工学論文集，第50巻，pp.799-804，2006。
- 12) 内田龍彦，河原能久：二次元浅水流の保存型CIP陽解法の開発とその検証，応用力学論文集，Vol.9，pp.917-924，2006。
- 13) 中川一，高橋保，澤田豊明，石橋晃睦：豪雨性表層崩壊に起因する土石流の規模予測とGISを用いた避難行動の解析，水工学論文集，第42巻，pp.325-330，1998。
- 14) Nakamura, T., Tanaka, R., Yabe, T., and Takizawa, K.: Exactly conservative semi-Lagrangian scheme for multi-dimensional hyperbolic equations with directional splitting technique, *Journal of Computational Physics* 174, pp. 171-207, 2001。
- 15) 氾濫シミュレーション・マニュアル，土木研究所資料，第3400号，1996。

(2007.4.5 受付)