

ため池損壊にともなう貯留水の流出シミュレーション

OUTFLOW SIMULATION OF WATER STORAGE CAUSED RESERVOIR DAMAGED

和田 光真¹⁾, 久保 栞²⁾, 吉田 秀典³⁾

Mitsumasa WADA, Shiori KUBO, and Hidenori YOSHIDA

- 1) 香川大学大学院工学研究科 (〒 761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: s15d401@stu.kagawa-u.ac.jp)
2) 香川大学大学院工学研究科 (〒 761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: s16g412@stu.kagawa-u.ac.jp)
3) 香川大学工学部 (〒 761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: yoshida@eng.kagawa-u.ac.jp)

The Kyushu heavy rain in July 2017 brought down several flood disasters. The copious amount of water and flood wood drift into a specific storage reservoir, and the spillway of the reservoir was damaged and enlarged which caused the outflow from the spillway. The damaged area at the downstream basin of the reservoir is entirely different from the hazard map which was compiled by Asakura city office. Such difference can bring about wrong evacuation, the uneconomical investment of tax money, or inefficient disaster prevention countermeasures. Thus, in this study, the flood analysis is carried out and the flood area obtained from the analysis is compared with the real one at the downstream basin of the reservoir to solve such problems. Through the comparison, they are very similar. Furthermore, the change of inundated area with every moment can be concerned with the analysis, which is quite useful for the evacuation plan. In the future, the analysis should accomplish the creation of evacuation plan and hazard map.

Key Words: Reservoir overflow, Flooding, Hazard map, OpenFOAM

1. 緒言

近年、線状降水帯の形成に伴う猛烈な雨が、特定の地域へ継続して降ることによって記録的な累加雨量となり、河川では氾濫危険水位を超える洪水が、また山間部では斜面崩壊等を起因とする土砂災害が発生している⁽¹⁾⁽²⁾。特に農業用ため池は山間部の土石流の流出経路に存在することが多く、その中には老朽化によって改修が必要なため池も少なくない。集中豪雨によって急激に増水すると、吐水口が十分管理されていない古い農業用ため池は、急激な増水に耐えられない可能性がある⁽³⁾。このような古いため池は、流木を含む土石流により、短時間で吐水口でふさがれると、一気に決壊に至る場合もある。ため池の下流に住宅地があるような地域においては、上流のため池の決壊によって大量の流木を含む土砂が流れ込み、被害は甚大となる。こうしたことを受け、水害等に関するハザードマップの配布が平成17年5月の水防法の改正により義務化され、各自治体により災害情報等の伝達方法および避難場所などの周知の徹底がなされた。その結果、全国のため池のうち、下流域に住宅や公共施設等が存在する主要なため池に関しては、ため池ハザードマップが整備された⁽⁴⁾。さらに、過去に土砂および洪水の災害経験が

ある地域においては、ワークショップ手法により独自の詳細な自主防災マップが作成され、防災訓練に活用している⁽⁵⁾。しかしながら、これらの自主防災マップは、河川の氾濫およびため池決壊による浸水予測範囲が地図上で示されているものの、時々刻々と変化する浸水の状況までは示されていない。また、自主防災マップのため池の決壊に関しては、流出経路が地形に沿っているとは限らず、流出先端の平野部における浸水分布が標高とは無関係な広がりを示したり、周囲より低地であってもあたかも浸水しないような表現がなされていたりする場合がある。このため、安全側の被害想定を示す自主防災マップが、場所によっては被害が過小評価され、自主防災マップを参照する自治体や防災組織などの防災担当者にその脅威が伝わらない場合は、災害リスクそのものが過小評価される可能性もある。既往の研究として、河川の洪水氾濫解析および山間部の土石流氾濫解析を用いて地域ごとの災害リスクを評価する手法が提案されている⁽⁶⁾が、ため池の決壊による浸水については、ほとんど研究されておらず、その有用性が証明されていない。

そこで本研究では、ため池の下流域にある市街地の浸水リスクを把握するために再現解析を実施し、解析の最終結果、浸水被害の実例および自主防災マップにおける「堤が決壊し

た場合に浸水のおそれがある範囲」との相違点の抽出を行う。また、浸水解析の時間的変化を示し、浸水経路についても考察する。なお、後述する再現解析の対象は、上流のため池堤体の決壊ではなく、中流域のため池の自然放流およびその下流域の市街地エリアの浸水状況とする。

2. 基礎理論の概要

浸水解析には数値流体力学オープンソースコードの OpenFOAM (7) を用いた。流体理論については、連続体的な二次元手法では表現できない三次元の乱流の動きや水の跳ね返りや飛散の非連続的な現象を表現できる気液相混相流モデル：VOF (Volume of Fluid) 法 (8) (9) に基づく界面捕獲法を採用し、不混和流体で、非圧縮・等温混相流としている。非圧縮性流体の連続式、Navier-Stokes 方程式 (NS 方程式)、自由表面の移流方程式をそれぞれ以下に示す。まず、連続式は以下の通りである。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{v} は速度ベクトルである。次に基礎方程式を定義する。流れの基礎方程式は NS 方程式であるが、より安定的な挙動を確保するために表面張力を考慮すると、以下のように規定される。

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (2)$$

ここで、 t は時間、 ρ は密度、 p は圧力、 μ は粘性係数、 \mathbf{f} は表面張力を含む外力項である。また、粘性応力テンソルを τ 、動粘性係数を $\nu (= \mu/\rho)$ とすると、

$$\tau = \mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) = \nu \rho (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \quad (3)$$

と表現されるため、式 (2) の右辺第 2 項は、

$$\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} = \frac{1}{\rho} \nabla \tau \quad (4)$$

となる。また、式 (2) の右辺第 3 項 \mathbf{f} は、表面張力項 \mathbf{f}_σ と重力項 \mathbf{g} に分けると以下に表現される。

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_\sigma + \mathbf{g} = \sigma \kappa \mathbf{n} + \mathbf{g} \quad (5)$$

ここで、 σ は表面張力係数、 κ は界面曲率、 \mathbf{n} は界面法線ベクトル、 \mathbf{g} は重力加速度であり、 $\kappa = -\nabla \cdot \mathbf{n}$ の関係性がある。式 (4)、(5) より、基礎方程式 (2) は以下のように表される。

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \tau + \sigma \kappa \mathbf{n} + \mathbf{g} \quad (6)$$

次に、自由表面の移流方程式を定義する。VOF 法では、解析領域の各要素に占める液相の体積分率を α として定義し、この移流方程式を解くことで界面を求める。 α の保存式を次式にて表現する。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{v}) = 0 \quad (7)$$

ここで、体積分率 α は以下のように区分される。

$$\begin{cases} \alpha = 0 : \text{気体のみ} \\ 0 < \alpha < 1 : \text{気液混相} \\ \alpha = 1 : \text{液体のみ} \end{cases} \quad (8)$$

また、気相に関する密度を ρ_a 、粘性係数を μ_a 、液相に関する密度を ρ_w 、粘性係数を μ_w とすると、密度 ρ および粘性係数 μ は、

$$\rho = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a \quad (9)$$

$$\mu = \alpha \mu_w + (1 - \alpha) \mu_a \quad (10)$$

と表現される。また、気相の速度を \mathbf{v}_a 、液相の速度を \mathbf{v}_w とすると、それぞれの領域における移流方程式は以下の通りとなる。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot ((1 - \alpha) \mathbf{v}_a) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{v}_w) = 0 \quad (12)$$

式 (11)、(12) より、気相と液相の流速差を $\mathbf{v}_r (= \mathbf{v}_a - \mathbf{v}_w)$ とすると、移流方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{v}) + \nabla \cdot ((1 - \alpha) \alpha \mathbf{v}_r) = 0 \quad (13)$$

その他は、OpenFOAM にて実装されているライブラリから、流速と圧力の式 (1)、(2) の連成解法に PISO 法 (10) を採用した。PISO 法は、非定常流れにおいて、前のステップの圧力場を初期推定値とし、2 回程度の繰り返し計算によって速度場の予測値を低コストで算出する手法である。また、ため池からの水流は河川と同程度以上となることは明らかのため、レイノルズ数は 10^6 程度の乱流となり、NS 方程式に代入される渦粘性係数については、SST k- ω モデル (SST モデル) (11) を採用した。SST モデルは、凹凸の底面における流れの剥離現象を表現することが可能で、地盤の境界面で安定した解が得られる。OpenFOAM のライブラリに必要な初期パラメータは、乱流エネルギー k と比エネルギー散逸率 ω であり、以下に表現される。

$$k = \frac{3}{2} (|\mathbf{v}_c| \cdot |I|)^2 \quad (14)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{L} \quad (15)$$

ここで、 \mathbf{v}_c は代表速度ベクトル [m/s] であり、既往の研究 (12) を参考に 2.00 [m/s] とした。 I は乱れ強度 [%] であり、既往の実験結果 (13) を参考に 5% とした。 L は代表長さ [m] であり、乱流混合層 (流れが混ざり合っている層) で $0.07 D$ (D は混合層の厚み) とした。本研究において採用した乱流モデルの解析パラメータを Table 1 に示す。

Table 1 RANS parameters

RANS model		Values
Velocity \mathbf{v}_c [m/s]		2.00
Hydraulic diameter D [m]		20.00
Turbulent intensity I [%]		5.00
SST model	k [m ² /s ²] 式 (14)	1.50×10^{-2}
	ω [s ⁻¹] 式 (15)	8.74×10^{-2}

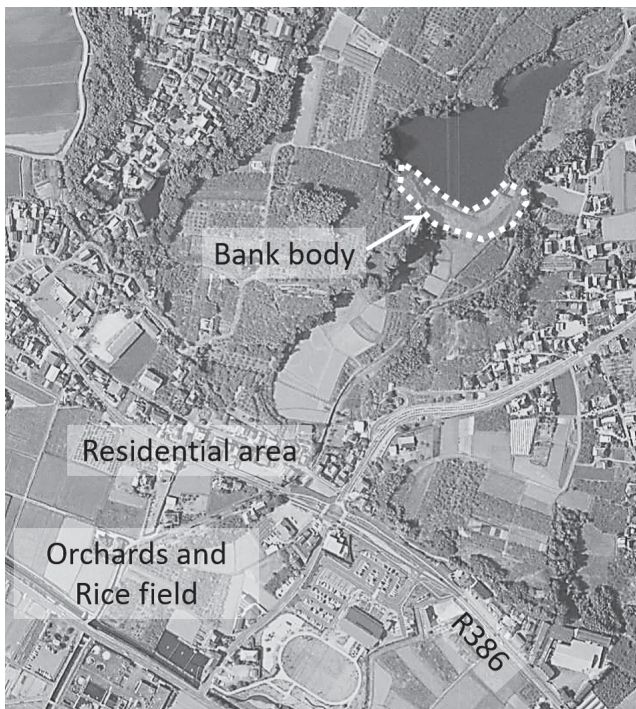


Fig.1 Aerial photograph *

害では、それら一帯に大量の土砂が流入し、周辺の農地における土砂の堆積は深さ 20 cm 程度となった。同地域においては、平成 24 年九州北部豪雨⁽¹⁷⁾による洪水被害を経験していたため、地域ごとに詳細な自主防災マップを作成し、それを基に避難訓練の実施等を行ってきたが、自主防災マップは安全側に見積もって作成されるはずが、下流における浸水領域は実際の半分程度であった。

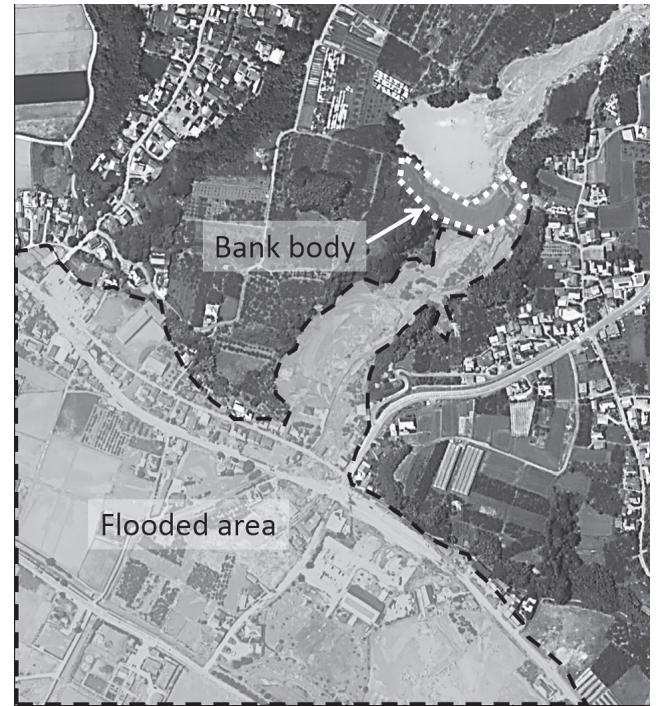


Fig.2 Flooded area *

3. 浸水解析

3.1. 解析対象

本研究では、豪雨による大量の土石流等がため池へ流入することにより、ため池が貯水容量を超え、吐水路等から流出した水が下流の住宅地域へ流れ込む浸水範囲を時系列で把握するため、浸水シミュレーションを行った。対象となるため池は、平成 29 年 7 月九州北部豪雨による被災ため池の一つである鎌塚（かまつか）ため池とした。ため池の規模は、堤高 11.5 m、堤長 122.0 m、総貯水量 99,000 m³、流域面積 2.77 km²、堤体の高低差 11.5 m である。鎌塚ため池の吐水路からの流出によって、大量の流木や土砂等が下流の集落および田園地域に堆積した。被害の状況を被害前後で比較するため、浸水被害前の国土地理院による航空写真を Fig. 1 に、浸水被害を受けた後の航空写真⁽¹⁴⁾を Fig. 2 に示す。なお、洪水痕跡を時系列で示すデータは入手できなかった。

被害の主な原因として考えられているのは、上流の山の神（やまのかみ）ため池が決壊し、大量の土砂と流木が鎌塚ため池へ流入したためであると調査より報告されている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。その結果、満水位まで土砂等が堆積し、堤体越流はしなかったものの、堰き止められた土砂は大量の流木とともに堤体の下方へ流れて側方の洪水吐水路に集中し、その結果、吐水路も大きく侵食した。下流域の解析対象となる山田（やまだ）地区は、崩壊した山の神ため池および浸食された鎌塚ため池を上流にもつ奈良ヶ谷川（Fig. 3 参照）の下流域で、河川ならびに河川上部を横切る国道 386 号線沿いに集落が分布している。下流においては、奈良ヶ谷川と交差する用水路に至るまでの間に果樹園や水田が広く分布しており、今般の豪雨災

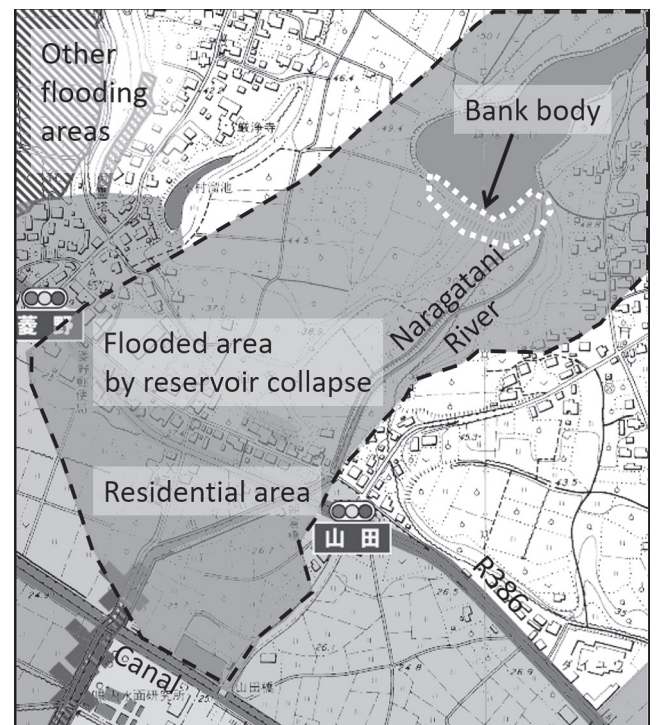


Fig.3 Voluntary disaster prevention map **

* Adapted from Geospatial Information Authority of Japan

** Adapted from ASAKURA CITY Official Web Site

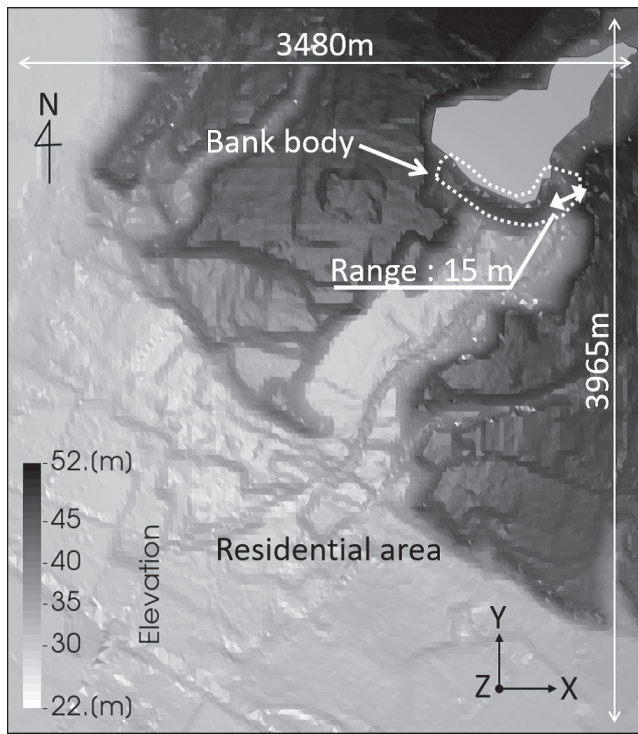


Fig. 4 Analysis area

3.2. 解析モデル

本研究では、上記の地域の中で、住宅被害の直接原因となった中間部のため池に貯留された水の流出に着目し、浸水解析を行った。3次元解析領域の平面図(XY平面)をFig. 4に示す。XY平面は、国土地理院の数値標高モデル⁽¹⁸⁾のうち5mのメッシュを利用した。Z方向はため池深さ10mおよびため池の高低差を考慮して全体の高さ D を20mとした。また、高さ方向のメッシュ幅については、解析精度を考慮して、最下層においては0.5m、最上層においては5mとし、二層目からは上層にむかって徐々に大きくし、合計で5,519,280個の要素を用意した。地表面の粗度係数については、ため池堤体の周辺は建物が少なく生活道路および耕地が主に分布しているため、 $0.02\text{ m}^{-1/3}\text{ s}$ とした。水の流出口となった吐水路は若干の破損程度にとどまったと報告されている。これは、吐水口がコンクリート等で補強されていたため、破堤幅と高さはほぼ一定値に保たれたものと推測する。よって、当該吐水路付近の幅と高さについては、国土地理院の数値標高モデルそのままの状態で作成した。吐水路の幅を計測すると、約15m (Fig. 4参照)である。解析では、この吐水路からの自然放流を再現した。また、境界条件については、地表底面を非流出境界、上空の頂面を大気境界、水平方向の側方四面を流出境界とした。上流のため池の決壊による水流は、一旦、鎌塚ため池で堰止められ、時間の経過とともに、ため池の水量が徐々に増加し、容量を超えた時点でため池側方の洪水吐水路から流出したとされている。つまり、鎌塚ため池は、当時満水状態であり、これを基に解析する。水量については、高さ10mのボックス状の水柱を、ため池の水量および平面形状にあわせて複数配置し

Table 2 Analysis conditions

Condition		Values
Water	ν_w [m ² /s]	1.00×10^{-6}
	ρ_w [kg/m ³]	1.00×10^3
Air	ν_a [m ² /s]	1.48×10^{-5}
	ρ_a [kg/m ³]	1.00
Surface tension σ [kg/s ²]		0.07
Gravity acceleration g [m/s ²]		9.81

た。なお、自然放流のため、吐水路の幅およびため池の水深の違いによる浸水範囲の影響は小さいため、本研究では感度解析は行っていない。Table 2に気相(空気)と液相(水)の解析条件を示す。

3.3. 解析結果および考察

本研究は、前述の通り、満水状態のため池のモデルを作成し、ため池側面の吐水口から自然流出させた。解析開始より、5分後、15分後、30分後および60分後という各時間における浸水状態を、それぞれFig. 5, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8に図示した。コンター分布は、前述のVOF法(Volume of fluid)による液相体積分率(α)を示している。本研究は、水面形状の詳細な状態を再現するのが目的ではなく、どの程度の浸水があったかが知りたいことから、解析領域における底面要素に着目し、この要素における α から浸水深を見積もることとした。ここで、要素の高さは、前述のとおり0.5mと設定しているため、 α が0.5を超えると浸水高さは0.25mを超える。この高さは、成人の膝丈程度であり、通常の避難は困難となる。

5分後(Fig. 5)の解析結果において、ため池の左端から不自然に流出している箇所がある。ここは堤体よりも標高が高いため、実際は水が流出することはないが、解析上、初期においてため池の箇所で設定した水位よりも標高が低い閉鎖領域では、微小な誤差により液相の体積分率が0を上回ることがある。このため、描画的にはこのような不自然な流れに見えるが、閉鎖領域から水が溢れるようなことにはならないことから、今般の解析対象の周辺箇所への影響はない。よって、本論文ではそのまま図示している。今後、改善を図りたいと考えている。また、堤体の右側面にある吐水路から主に流出するが、解析の初期においては、上記の理由で堤体の上部においても流れがあり、これも解析初期に発生する誤差の範囲とする。

15分後(Fig. 6)においては、奈良ヶ谷川の容量を大きく超えた水流が、谷の地形に沿って流れている。下流域の各所において完全に水没が認められるが、高台は浸水していない。流出の先端は、国道および住宅地まで達し、平野部に向かって広がりを見せつつある。

30分後(Fig. 7)においては、住宅地のほぼ全域が浸水している。ごく一部の標高が高くなっている場所では水が回り込むような動きを見せているが、流出先端部の果樹園や水田が分布する地域(Fig. 1)のほとんどでは三角州状に広がって

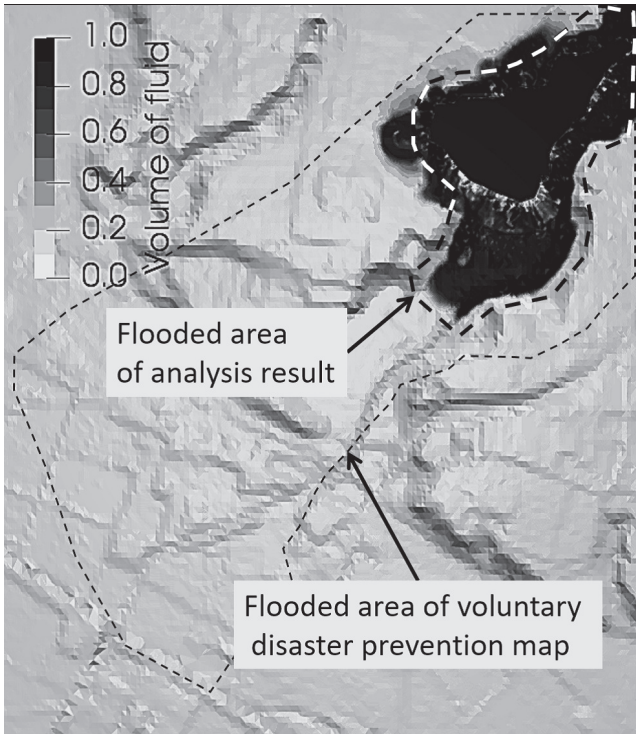


Fig. 5 Flooding area [5 min]



Fig. 6 Flooding area [15 min]

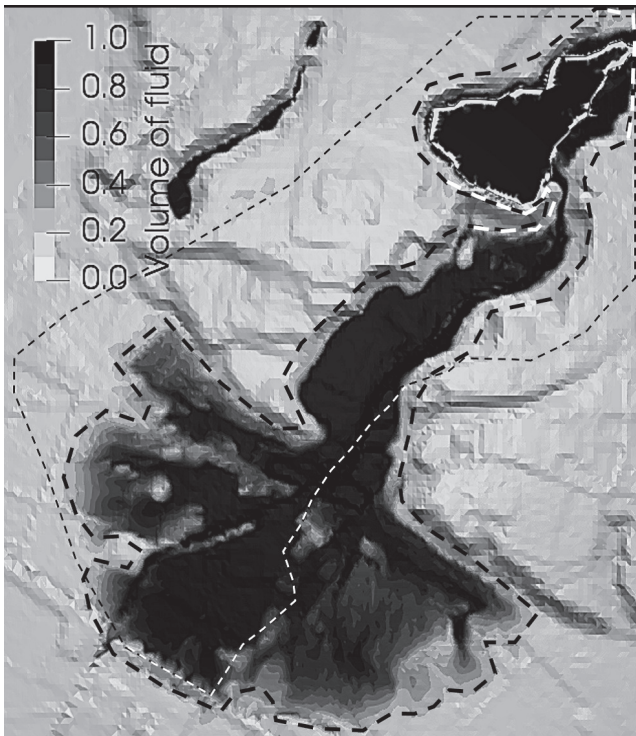


Fig. 7 Flooding area [30 min]

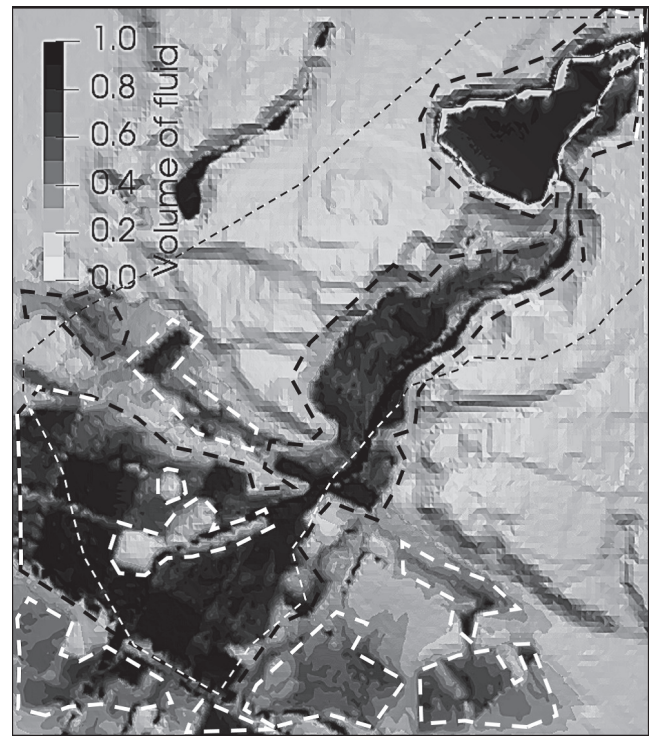


Fig. 8 Flooding area [60 min]

浸水している。

60 分後 (Fig.8) においては、ため池貯水高さが吐水路下端の高さまで下がり、供給をほぼ失った水は勢いを失い、下流域において、側方に広がった水はゆっくりと道路などに沿うようにして土地の低い方へ戻り始めている。以上より、地形に依存して水たまりになるリスクが高い地域が明らかとなった。ここで、解析結果と実際の被害 (Fig.2) とを比較する。放流が落ち着いた後、解析において水が溜まる場所と写真における被害状況とがおおむね一致するものの、解析結果と自主防災マップ (Fig.3) とを比較すると、浸水経路および浸水範囲ともに大きな相違が見られた。

こうした結果は、自主防災マップを補完するような地形データ等を忠実に反映した数値解析として、今後重要になるであろう。

4. 結言

本研究では、平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害の事例を題材として福岡県朝倉市の山田地区を対象として浸水解析をおこなった。解析の結果、浸水被害を受けた地域と解析結果により浸水した範囲はおおむね一致したものの、解析結果と自主防災マップと比較すると、下流の流出域の範囲に大きな差が見られた。解析においては、時間的な浸水状況も明らかになるため、一般の方々でも浸水のイメージが容易となり、避難計画にも役立たせることができる。さらに、地形の高低差により水が引きにくい地域も明らかとなるため、避難経路や交通規制の参考となる資料を提供することができる。

今後の展開として、浸水状況と避難解析を同じ時間軸で行い、浸水被害に応じた避難シミュレーションを行い、ため池の決壊あるいは損傷時に、即、避難が完了できるのか、また、避難できないとすれば、どのような避難行動をとるべきかなどについて実施する。

参考文献

- (1) 気象庁：平成 29 年 7 月 5-6 日の福岡県・大分県での大雨の発生要因について ～上空寒気による不安定の強化と猛烈に発達した積乱雲による線状降水帯～，http://www.jma.go.jp/jma/press/1707/14b/press_20170705-06_fukuoka-oita_heavyrainfall.html，(平成 29 年現在閲覧可)
- (2) 国土交通省九州地方整備局：平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害に関する情報，http://www.qsr.mlit.go.jp/bousai_joho/H29hokubugouu.html，(平成 29 年現在閲覧可)
- (3) 農業農村工学会：平成 29 年 7 月九州北部豪雨による被災ため池等の第一次現地調査報告書 (速報) 平成 29 年 8 月 21 日版，http://www.jsidre.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2017/08/170821_kyushuhokubugou-report.pdf，(平成 29 年現在閲覧可)
- (4) 農林水産省：ため池ハザードマップポータルサイト，<http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/tameike/portal.html> (平成 29 年現在閲覧可)
- (5) 朝倉市：朝倉地区自主防災マップ，<http://www.city.asakura.lg.jp/www/contents/1332397590637/index.html>，(平成 29 年現在閲覧可)
- (6) 田中 耕司・金 淵中・中島 秀明・中北 英一・養老 伸介・羽生 雅則：豪雨による洪水・土石流の発生を想定したマルチ・ハザードと避難判断基準に関する研究，河川技術論文集，Vol.21，pp.485-490，2015
- (7) OpenCFD Ltd (ESI Group)：OpenFOAM，<http://www.openfoam.com>，(平成 29 年現在閲覧可)
- (8) C.W. Hirt, B.D. Nichols：Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol.39, p.201, 1981
- (9) 秋山 守，有富正憲：新しい気液二相流数値解析-多次元流動解析-，コロナ社，272P，2002
- (10) R. I. Issa：Solution of the Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator-Splitting, Journal of Computational Physics, Vol.62, pp.40-65, 1985
- (11) F.R. Menter：Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 93-2906, 1993
- (12) F.R. Menter, M. Kuntz and R. Langtry：Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence model. Turbulence, Heat and Mass Transfer, Vol.4, pp.624-632, 2003
- (13) 川崎 佑磨，中尾 尚史，伊津野 和行：矩形断面桁に作用する津波荷重と圧力に関する二次元混相流解析，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.71, No.2, pp.199-207, 2015
- (14) 国土地理院：6 月 30 日からの梅雨前線に伴う大雨及び平成 29 年台風第 3 号に関する情報，http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H29hukuoka_ooita-heavyrain.html，(平成 29 年現在閲覧可)
- (15) 土木学会：平成 29 年九州北部豪雨災害先遣調査報告 2 朝倉山田地区 (溜池決壊と流木)，<http://committees.jsce.or.jp/report/node/149>，(平成 29 年現在閲覧可)
- (16) 地盤工学会：「平成 29 年 7 月九州北部豪雨」地盤災害説明会 -被害の状況とこれから私たちが気をつけること-，https://www.jiban.or.jp/?page_id=4827，(平成 29 年現在閲覧可)
- (17) 気象庁：平成 24 年度災害時自然現象報告書，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2012.html，(平成 29 年現在閲覧可)
- (18) 国土地理院：基盤地図情報，<http://www.gsi.go.jp>，(平成 29 年現在閲覧可)