

I-29 集中豪雨による浸水被害拡散シミュレーションシステムの開発

Development of Flood Damage Diffusing Simulation System for Localized Torrential Rainfall

井面仁志¹・白木渡²・長谷川修一³・野々村敦子⁴・難波大祐⁵

Hitoshi INOMO, Wataru SHIRAKI, Syuuichi HASEGAWA, Atuko NONOMURA, Daisuke NANBA

抄録: 近年、局地的な集中豪雨が全国において多発している。集中豪雨は、突発的に発生し、短時間で多くの雨を降らせるために、被害が深刻化してしまうケースが多い。被害を軽減する対策としては、排水施設の整備等のハード対策と防災教育などのソフト対策が挙げられるが、ハード対策には多くの時間と費用が必要である。そこで、本研究では比較的少ない費用ですぐに実施可能な防災教育や避難訓練等のソフト対策に用いることを目的として、集中豪雨による浸水被害拡散シミュレーションシステムの開発を行う。そして、開発したシステムを用いて、浸水被害状況、危険箇所の確認を行ない、土のうなどの設置効果および防災教育教材への活用を検討する。

Abstract: Recently, a localized torrential rainfall frequently occurs in various parts of Japan. The feature of this rainfall occurs suddenly, and makes a lot of rain fall in a short time. Therefore, damage often becomes aggravated. There are hard measures and soft measures as damage mitigation measures, but so much time and cost are necessary for hard measures. In this study, a flood damage diffusing simulation system for the localized torrential rainfall is developed for using disaster prevention training and the evacuation drill, etc. with the small expense comparatively and enforceable at once. Using this developed system flood damage situations, dangerous parts are checked, and then the effect of mitigation of installation such as breastworks is confirmed.

キーワード: 集中豪雨, シミュレーションシステム, 浸水, セルオートマトン

Keywords: Torrential Rainfall, Simulation System, Flood, Cellular Automata

1. はじめに

近年、局地的な大雨が全国で多発している。これらの大雨は“ゲリラ豪雨”や“集中豪雨”と呼ばれ、半径 10km ほどの局地的な場所に雨を降らせる現象である。降水量が非常に多く時間雨量 50mm を超える場合がほとんどである。そのため、前日まで二週間の総雨量と合わせて合計 200mm を超えると土砂崩れや鉄砲水などの自然災害を発生させる可能性が非常に高くなっており、全国的に多くの被害を出した。集中豪雨は、台風などと違い突発的に発生するので、被害が深刻化してしまうケースが多い。

香川県は、気象的・地理的に渇水被害を受けやすい地域である。裏を返せば、少しの降雨に対して被害を受けやすい地域でもある。実際、平成 20 年 9 月 21 日

に高松市に時間雨量 20~30mm が降り、大雨・洪水注意報が発令され、道路の冠水 11 箇所、床下浸水 9 棟、通行止め 2 箇所が確認されている。被害が出た地域では、実際の降雨量はそれより多かったとも考えられる。しかし、いずれにしてもこのように降雨災害に対して脆弱性を有しており、緊急な対応が求められている。地球温暖化の進行とともに、今後も集中豪雨は減るどころかむしろ増えることが考えられており、その対策が急がれている。対策としてまず考えられることとして、排水施設の整備というハード防災対策があるが、ハード対策には莫大な費用と長い期間が必要である。従って、比較的少ない費用ですぐに対応可能な対策として、防災教育や避難訓練等のソフト防災対策が注目されるようになってきている。

ソフト防災対策のツールとして各自治体が公表して

1 : 正会員 博士(工) 香川大学 教授 工学部信頼性情報システム工学科

(〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20, Tel 087-864-2245, E-mail inomo@eng.kagawa-u.ac.jp)

2 : フェロー会員 工博 香川大学 教授 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

3 : 正会員 工博 香川大学 教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

4 : 正会員 工博 香川大学 准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

5 : 非会員 (株)岡山情報処理センター (〒700-0901 岡山県岡山市北区本町 6 番 36 号第一セントラルビル 3 階)

いる水害ハザードマップがあるが、時間経過による浸水状況の変化を確認することが出来ない。また、洪水シミュレーターも開発・市販されているが、ソフトの値段が高価で、利用に専門知識が必要^{1),2)}であるなど防災教育用教材として手軽に利用できる状況ではないという問題点がある。

本研究では、誰でもが簡単に利用できる集中豪雨による浸水被害拡散シミュレーションシステムを開発し、そのシステムを効果的なハード並びにソフト防災対策への活用を検討する。具体的には、複雑系のシミュレーションに有効なセルオートマトン (CA) 法³⁾を用いて、高松市二番丁地区を対象として、集中豪雨による浸水被害拡散シミュレーションシステムを開発する。対象とした高松市二番丁地区は、平成 16 年の台風 16 号の高潮による浸水被害を受けており、比較的浸水被害を受けやすい地域である。そして、そのシステムを時間雨量 50mm と 100mm の集中豪雨が降った場合に適用して、浸水被害拡散状況の把握並びに危険箇所を確認し、ハード防災対策として実施される土嚢、排水ポンプ、排水溝等の設置効果を検討する。さらに、そのシステムを活用して突発的に発生する集中豪雨の危険性を伝え、人的被害を軽減するための防災教育教材への活用を検討する。

2. 浸水被害拡散シミュレーションの開発

(1) セルオートマトン法とは³⁾

セルオートマトン法とは、ジョン・フォン・ノイマンの有限オートマトン理論を起源に持つシミュレーション手法の一つであり、格子状のセルと単純な規則からなる、離散型計算モデルである。特徴としては簡単なセル間での相互作用により複雑な現象を再現できる。また、無限に広がる格子状のセルで構成されており、各セルは有限種類の内部状態を持ち時間が進むと共に内部状態が変化していく。また、ここでの時間というのは離散的なものであるため、時刻 $t+1$ におけるセルの内部状態は、時刻 t におけるそのセル自体と近傍のセルの内部状態によって決定される。セルオートマトン法は非常に単純化されたモデルであるが、生命現象や結晶の成長、乱流といった複雑な自然現象を模した結果を得ることができる。

現象には単純な素過程とそれが複合してできた複雑なものがある。流体の流れの特徴は微分方程式で表されてきたが、乱流は様々な素過程が複雑に複合し、素過程間の関係を定義することが難しい。しかし、セルオートマトン法では流体の質量と運動量との関係を、ミクロなレベルでの粒子の衝突における質量と運動量との関係に置き換えることができる。そのため、微分方程式では記述することが困難である乱流を、単純な粒子の衝突で表すことができる。

セルオートマトン法の大きな利点としては、従来の

微分方程式モデルに代わり簡単な関係式によって表現できるだけでなく、自然界の不規則性や複雑性を再現することができることにある。また、乱流遷移や地震、火災などといった臨界現象も再現することができる。そして、なにより刻一刻と変化しているそれらの状況を、視覚的にかつリアルタイムで見ることができ、その場所の情報を得ることができるという利点がある。

(2) 二次元セルオートマトンの概要³⁾

本節では、本研究で用いる二次元セルオートマトンの概要を説明する。二次元の場合、無限の平面ではなく有限の四角形で表せる格子で表現される。二次元セルオートマトンには、あるセルの上下左右 4セルの内部状態を考慮するノイマン近傍型と、周囲 8セルの内部状態を考慮するムーア近傍型が存在する。本研究では、降雨の拡散を精度良くシミュレーションするために、ムーア近傍型を使用する。

セルオートマトン法では、予め決められたルールでセルの内部状態の時間変化をモデル化する。このルールを時刻 $t=0$ における状態に適用し、時刻 $t=1$ における状態を決定する。次に、時刻 $t=1$ における状態から時刻 $t=2$ における状態を決める、というように繰り返す。この手順がセルオートマトンの原型である。二次元セルオートマトンの説明に良く用いられるライフゲームを紹介する。ライフゲームでは、以下のようなルールが設定されている。

誕生：死んでいるセル(白)の周囲に 3つの生きているセル(黒)があれば、次の時間ステップでは生きる(黒になる)。

維持：生きているセル(黒)の周囲に 2つか3つの生きているセル(黒)があれば、次の時間ステップでも生き残る(黒のままである)。

死亡：上記以外の場合は、次の時間ステップで死ぬ(白になる)。

以上のルールを図-1(a)に適用すると、次の時間ステップでは図-1(b)のように変化する。なお、この場合領域外は全て白のセルである。

(3) シミュレーション条件の設定

セルオートマトン法を用いて集中豪雨シミュレーションシステムを構築するには、まず雨が降る地上空間のモデル化、次に降った雨が時間の経過とともに地上空間を拡散していくルールの設定が必要である。以下、空間のモデル化、時間のモデル化、セルの状態設定について説明する。

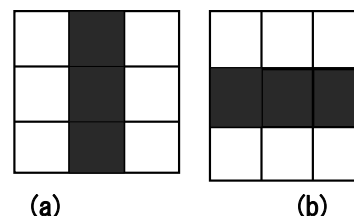


図-1 ライフゲームにおけるセルの変化

a) 空間及び時間のモデル化

本研究では、シミュレーションモデルの簡略化を図るため、二次元空間モデルを用いる。地上を真上から見下ろしている視点を想定し、有限セルオートマトンを格子状に配置する。格子状に区切られた空間一つをセルと呼び、それらを平面に配置することにより二次元セルオートマトンの空間を設定する。本研究では、国際航業（株）のレーザー計測によって得られている4mメッシュの標高データを使用するため、対象地域を4mメッシュで分割して空間モデルを作成する。

セルオートマトン法を用いたシミュレーションでは、時間単位として“step”を用いる。シミュレーションの処理としては、時間 t から時間 $t+1$ の間に、あるセルが隣接する8セルの内部状態の影響を受け状態を変化させる、もしくはそのままの状態を維持する。この処理を行う時間が1stepである。シミュレーションをより実用的、かつより現状を把握するためには時間という概念が必要となってくる。そのため、この時間“step”の概念を取り入れることで、ある場所に降った雨が時間の経過とともにどのように拡散しどの場所が浸水するかが理解しやすくなる。

本研究では、時間雨量 50mm の雨と時間雨量 100mm の雨が降った場合の2パターンを想定したシミュレーションを作成する。シミュレーションの時間のモデル化にあたり、シミュレーションの1stepを実時間で何秒に相当するかを決定する必要がある。しかし、今回対象とする高松市二番丁地区で過去に時間雨量 50mm、100mm という豪雨を経験したことがなく、実時間との対応付けが難しい。そこで、今回は、2004年8月31日～9月1日にこの地区が台風16号による高潮浸水被害を受けた際の実際の浸水域と本研究で構築したシミュレーションの最大浸水域との比較を行った結果から、シミュレーションの1stepを実時間の1.67秒と設定した。

b) 空間及び時間のモデル化

各セルは以下の3つの内部状態を持つ。セルのサイズは入手した標高データの縮尺によって変化する。本研究では、4mメッシュの標高データを用いるので、1セルは4m×4mの正方格子である。

・ 標高

標高データは、国土地理院等のJPGIS準拠データ⁴⁾などから標高データを抜き取って作成する。形式としては標高をカンマで区切り、海面や値の無い箇所は1,000,000という大きな数値を入力する形式とする。なお、本研究で開発する高松市二番丁のシミュレーションシステムでは、上述したように国際航業（株）のレーザー計測によって得られている4mメッシュの標高データを使用している。

・ 水深

雨水は予め設定したルールに従って移動拡散させるが、その移動拡散によって浸水した部分の水深量を可視化するために、**図-2**のように水深量に応じて色分けを行った。

・ 土囊

さらに、集中豪雨シミュレーションでは、シミュレーション実行中に任意の場所に土囊を設置することができる。その場合、標高の上に土囊の高さが加算され、土囊が設置されたように見える。設置された量によって**図-3**のように色分けされる。

(4) 水の移動法則

a) 水の拡散法則

水の移動法則は、水の拡散方向、移動量の二つの要素で移動する方向と量を決定する。まず、水の拡散方向についてであるが、周囲8セルの内部状態の合計値の比較によって決定する。内部状態の合計値とは、各セルそれぞれ標高、水深、土囊の高さの値を有しているため、その値の合計値を意味している。まず、周囲8セルの合計値を比較し最も合計値の低いセルを決定する。この時、最も低いセルが1つしかない場合は、その方向に水を移動させる。また、最も低いセルが2つ以上ある場合、ランダムに1方向を選択して水を移動させる。ただし、中心のセルの合計値が周囲の8セルのどの合計値よりも内部状態が低い場合は、水は移動しないものとする。

b) 水の移動量の決定

水の移動量を決定する際、中心のセルの合計値と移動

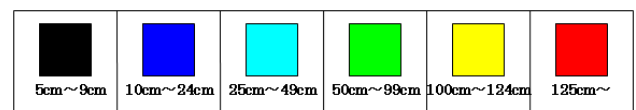


図-2 水深の配色

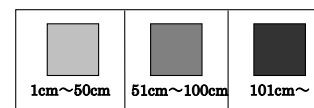


図-3 土囊の配色

先のセルの合計値との差が中心のセルの水深の2倍以上の場合と、2倍未満の場合との2種類存在する。差が2倍以上ある場合は、中心のセルから水が移動先のセルに全て移動する。この様子を**図-4**に示す。

また、差が2倍未満の場合は、中心のセルの合計値と移動先のセルの合計値が等しくなるように水を移動させる。この様子を**図-5**に示す。

(5) 集中豪雨シミュレーションの構築

集中豪雨は半径10km程度の狭い範囲に時間雨量50mm以上の雨が降る現象とされていることを踏まえ

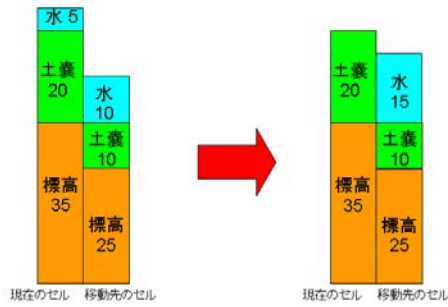


図-4 差が2倍以上の場合

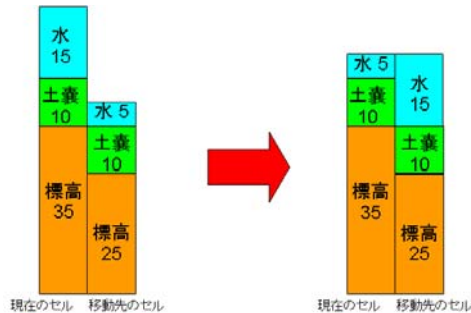


図-5 差が2倍未満の場合

て、本研究では、時間雨量 50mm と時間雨量 100mm の雨を想定したシミュレーションを構築する。シミュレーション結果をパソコンの画面で確認できるように、Java をプログラミング言語として用い、Applet viewer を用いて可視化した⁵⁾。

a) 集中豪雨の降水方法

本研究では、時間雨量 50mm と 100mm が対象地域全域に集中的に降った場合を想定してシミュレーションするため、シミュレーション範囲内全てのセルに同量の降水量を同時に降水追加している。そのため、1 step 毎に全てのセルの内部状態の水深に一定量を追加していくことになる。具体的には、以下のように 1 step に 1 セルへの降水量を決定する。

・時間雨量 50mm の場合：

$$50\text{mm} \times 1.67 \text{ 秒} \div 3600 \text{ 秒} = 0.0232 \text{ mm}$$

・時間雨量 100mm の場合：

$$100\text{mm} \times 1.67 \text{ 秒} \div 3600 \text{ 秒} = 0.0464 \text{ mm}$$

上述した水深分を 1 step 毎に各セルに付加した後に、(4)b)で述べた水の移動ルールによりシミュレーションを実行することにより、降った雨水が移動拡散する様子を再現することができる。

b) ハード防災対策機能の設定

本シミュレーションでは、集中豪雨による浸水災害を軽減するためのハード防災対策機能として、水の広がりを抑え、浸水を食い止めることのできる土嚢、1step に一定量排水することのできるポンプ機能、雨水を排水する機能を有する排水溝が設定されている。画面上をクリックすることでこれらのハード防災設備を設置可能にしている。

ただし、(3)a)で述べたように本研究では、国際航業(株)のレーザー計測によって得られている4mメッシュの標高データを使用するため、対象地域を4mメッシュで分割して空間モデルを作成している。従って、以下に示すハード防災対策としての土嚢、排水ポンプ及び排水溝による防災対策機能の設定は、各セル単位すなわち4mメッシュで実施することになっている。土嚢サイズや排水ポンプや排水溝による排水機能として4mメッシュはサイズ的には現実的ではないが、本研究では、ハード防災機能として土嚢による止水効果、排水ポンプや排水溝による排水効果を確認することに重点をおいており、シミュレーションは4mメッシュで実施することになっている。今後、よりメッシュサイズが小さな標高データが利用できればより現実的なものにしていくことは可能である。また、現在の4mメッシュサイズの場合でも土嚢のサイズや排水ポンプの機能を考慮して4mメッシュ内をさらに細分化してシミュレーションすることを検討していきたいと考えている。

・土嚢による防災機能の設定

土嚢を設置することにより、設置したセルの内部状態の合計値に土嚢の値が加算され、設置したセルの合計値を増すことができる。そのため、その方向に水が広がりにくくなり、浸水域の拡大を防ぐことができる。

・排水ポンプによる防災機能の設定

排水ポンプを設置することによって、設置したセルとその周囲8セルの水深を一定量減らすことができる。本システムでは、排水ポンプの機能がよく分かるように、排水能力が150 m³/minである排水ポンプを想定した。150 m³/minの排水を行うためには、1 step で1セルの水深量を何 cm 低くすることに相当するのかを計算する。まず、1step で何 m³排水されるのか計算する。1 step を1.67 秒と設定しているので、 $150 \times 1.67 \div 60 = 4.175 \text{ m}^3$ となる。1セルは4m×4mと設定しているので、1 step で水深を $4.175 \div 16 \approx 0.26\text{m}$ 減少させることになる。また、排水ポンプは周辺の水を吸い寄せて排水するイメージから、1つのセルから26cmを減らすのではなく周囲8セル全てから少しずつ水深を減少させるようにルール化した。減少させる割合は、中心セルからが最も多く6cm、周囲8セルからは2.5cmずつとした。

・排水溝による防災機能の設定

予め、排水溝をセル上に設置した状態でシミュレーションを行うことで、何処に排水設備を設置しておけば被害を減少効果が検討可能になる。ただし、本研究では、セルサイズを4m×4mに設定しているため16m²の範囲で排水が実施されることになり、現実とは異なる排水範囲や能力を設定する場合が考えられるので注意が必要である。セルサイズを小さく設定すればより現実に近いモデル化が可能になるが、現時点で入手できた標高データの最も小さいセルサイズが今回用いた

4m×4mで排水設備の設定を行った。確かに、現実的よりは少し大きな排水範囲ではあるが排水効果を確認するという目的は十分達成できると考えている。ただし、排水ポンプと同様にセルサイズが大きい場合には使用に際しては注意が必要である。なお、今回はシミュレーションプログラムを簡略化するために、排水溝を設置した内部状態の合計値を0とした。

3. 集中豪雨シミュレーションのハード防災対策への活用

(1) シミュレーションエリアの条件設定

本研究では、高松市二番丁地区をシミュレーション対象地区とする。この地区を選んだ理由は、平成16年の台風16号の高潮による浸水被害を受けており、比較的浸水被害を受けやすい地域である。また、ある程度標高に高低差があり、尚かつ詳細な標高データを取ることができたためである。南北1,948m、東西1,600mの範囲でシミュレーションを行った。実際にシミュレーションを行った範囲の航空写真を図-6に示す。なお、1stepが実時間1.67秒とした。

(2) シミュレーション結果の検証

シミュレーション結果の精度を検証するために、まず、シミュレーション範囲のどの部分が低い標高になっているの



図-6 シミュレーション範囲



図-7 時間雨量100mmにおけるシミュレーション結果(約30分後)

かを示す3Dマップと比較して検証を行う。図-7が時間雨量100mmの約30分後のシミュレーション結果、図-8が実際の標高を表した3Dマップである。なお、図-8の3Dマップにおいて、窪みや山は標高の高低を示している。検証の結果、3Dマップの赤い丸で囲んである部分が極端に低い標高となっているが、シミュレーション結果でも3Dマップと同じ箇所に水がたまっていることが確認できる。図-7のシミュレーション結果から、図-2に示す水深の配色図から赤丸の部分は125cm以上の浸水になっていることが見て取れる。この2つの場所にはいずれもアンダーパスが存在しており、過去の高潮災害や集中豪雨が発生した際通行不可能となっている。どちらのアンダーパスも交通量が多いので、通行不可能となった場合災害が発生しやすいと考えられる。シミュレーション結果はこのことをうまく捉えている。

次に、時間雨量50mmと時間雨量100mmでシミュレーションを実施した場合の浸水状況の変化を比較した。図-9(a)に時間雨量50mmの場合、図-9(b)に時間雨量100mmの場合のシミュレーション結果を示す。いずれもシミュレーションを600step(実時間16.7分)実行したした場合の結果である。まず、浸水範囲について比較する。2つのシミュレーション結果を比較すると、時間雨量100mmの場合、図-2に示す水深量の配色図の黒色(5cm~9cm)と紺色(10cm~24cm)のセルが時間雨量50mmの場合に比べ大幅に増えている事が分かる。次に、水深量について比較すると、水深量が時間雨量50mmの時には深い箇所を示す水色(25cm~49cm)、緑色(50cm~99cm)、黄色(100cm~124cm)は、時間雨量100mmになっても浸水範囲はあまり広がらず、水深量が大幅に増加している事が分かる。以上の結果より、時間雨量が増加すると、水深量が浅い箇所では浸水範囲が広がり、標高が低い箇所では浸水範囲は広がらず水深量が増加するという結果が得られた。これらの結果は、標高が同じ場所では水が広がっていき、高低がある場合は低い箇所に水がたまるという水の移動法則に当てはまっており、地域の浸水の傾向を再現することができている。これらのシミュレーション結果から、周辺地域に比較して狭い範囲で標高差が

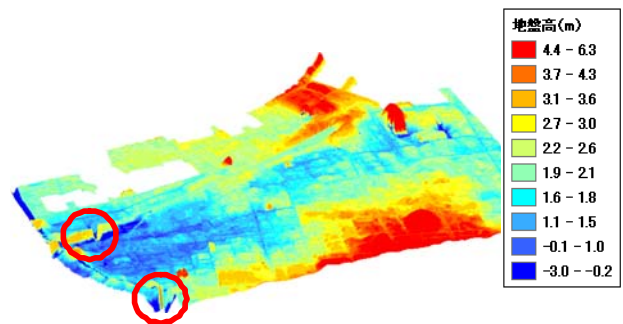


図-8 実際の3Dマップ



(a) 時間雨量 50mm



(b) 時間雨量 100mm

図-9 時間雨量の比較

大きい場合には、その標高が低い個所の水深が急激に上がり危険であることが分かる。

(3) ハード防災対策機能の検証

集中豪雨発生時には、土嚢、排水ポンプ、排水溝等のハード防災対策が実施されるが、その効果は実際に災害が発生した後にしか分からない。しかし、本研究で開発したシミュレーションシステムを活用すれば、それらのハード防災対策の効果を実前に検証することが可能になる。ここでは、2章でモデル化したハード防災対策機能の内、排水ポンプと排水溝の2つについて、防災機能を設置した場合としない場合についてシミュレーション結果を比較し、防災機能の効果について検証する。

a) 排水ポンプによる防災対策効果の検証

本システムでは、排水能力が $150 \text{ m}^3/\text{min}$ の排水ポンプを設置できるようにしており、浸水シミュレーションにおいては、2章に示したルールに従いシミュレーションを行い、排水ポンプにより防災対策効果の検証を行なう。

まず、南側のアンダーパスの箇所について、集中豪雨発生前に排水ポンプを設置した場合としない場合について比較する。集中豪雨シミュレーションは、時間雨量 100mm の雨で 600 step (実時間では 16.7 分) シミュレーションを実施する。排水ポンプを設置した場合の結果を図-10に示す。図-9(b)と比較すると排水ポンプを設置した場合は、 600step 経過しても、黒色(水深量 $5\text{cm}\sim 9\text{cm}$)のセルしかアンダーパス周辺に発生していない。そのため、時間雨量 100mm の雨が降っても、排水ポンプの効果が発揮されていることが確認できる。この機能を活用すれば、集中豪雨の規模



図-10 排水ポンプ設置あり

ごとに事前に排水ポンプの設置位置や容量を検討することができ、効果的な集中豪雨対策が可能になる。

次に、既に浸水している箇所に排水ポンプを設置した場合の効果を検証する。南側のアンダーパスの箇所に排水ポンプが最初から稼働する場合と 300 step (実時間で 8.35 分) 経過後から稼働する場合の2ケースを想定して比較する。なお、シミュレーションは 600 step まで実施する。図-11に最初から排水ポンプが稼働した場合、図-12に 300step から排水ポンプが稼働した場合を示す。図-12(図中○印)から分かるように、 300step から排水ポンプを稼働させた場合、周辺のセルで一部図-2の水深量の配色図の紺色($10\text{cm}\sim 24\text{cm}$)のセルが発生している。従って、最初から排水ポンプを稼働させた場合に比べ排水しきれない場合があるが排水ポンプを設置すれば、浸水量を減らす効果

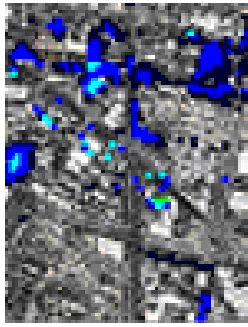


図-1 1 Ostep からポンプ稼働の場合



図-1 2 30 Ostep からポンプ稼働の場合

が確認できる。この機能を活用すればどの時点で排水ポンプを設置すれば効果が発揮できるか予め目安を検討しておくことができ、効果的な集中豪雨対策が可能になる。

今回は、例としてアンダーパス周辺での集中豪雨時の排水ポンプの排水効果について検証を行ったが、本研究で開発したシミュレーションシステムを活用すれば、同様な方法で排水が問題となる任意の箇所で排水ポンプの設置位置や設置効果が検証可能である。

b) 排水溝による防災対策効果の検証

時間雨量 100mm でのシミュレーションの結果、アンダーパスの箇所が通行不可能となることが明らかになった。そこで、アンダーパスに排水溝を設置するハード防災対策を実施する。ここでは、開発したシミュレーションシステムを活用して、その対策が有効か否かを事前に検討することを考える。南側のアンダーパスに排水溝を設置しない場合と設置した場合についてシミュレーションを実施し、それらの結果を比較する。まず、排水溝を 1 箇所設置した場合についてシミュレーションを実施する。シミュレーションは時間雨量 100mm の雨で、600step (実時間で 16.7 分) 実施した。排水溝を 1 箇所設置した場合の結果を図-1 3 に示す。排水溝を設置していない図-9 (b) と比較すると、水深量が赤色の 125cm 以上だったのに対し、排水溝を 1 箇所設置することで、水深量が紺色 (10cm~24cm)、水色 (25cm~49cm) になっている。図-1 0 で示した排水ポンプほどの排水能力は得られなかったが、排水機能としての有効性が確認できた。

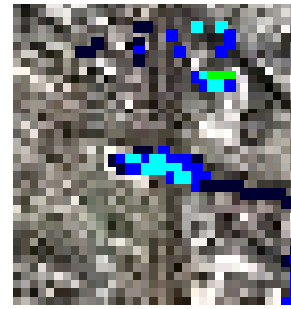


図-1 3 排水溝 1 箇所設置

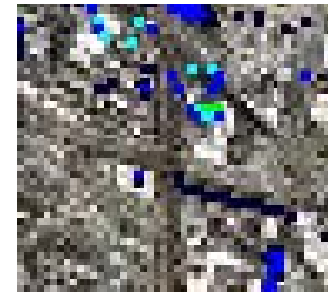


図-1 4 排水溝を 2 箇所設置

次に、南側のアンダーパスに排水溝を数カ所設置した場合について検証する。排水溝は地面に存在するので、近い場所に数カ所設置する事ができると考えられる。南側のアンダーパスに 2 箇所排水溝を設置した場合を想定して、1 箇所の場合と排水能力を比較する。2 箇所設置した場合の結果を図-1 4 に示す。図-1 4 から分かるように、水色 (水深量 25cm~49cm) の箇所がなくなっており、2 箇所設置した場合は、1 箇所だけ設置した図-1 3 と比べてより排水能力が高く、排水効果が現れていることが分かる。このことから、排水溝の数を増やせば排水能力が高くなり高い防災効果が期待できるが、その効果的な配置や排水能力の設定の検討が必要になる。従って、本システムを活用して事前に排水溝の設置位置、排水勾配 (本解析では、排水溝を設置している当該セルと周辺セルとの標高差をセルサイズ 4m で除した値) や排水能力を検討することにより、効果的な防災対策が可能になる。

今回は、例としてアンダーパス周辺での集中豪雨時の排水溝の排水効果について検証を行ったが、本研究で開発したシミュレーションシステムを活用すれば、同様な方法で排水が問題となる任意の箇所で排水溝の設置位置や設置効果が検証可能である。

(4) 防災教育教材への活用

開発した集中豪雨シミュレーションシステムを防災教育教材に活用する。集中豪雨シミュレーションでは、実際に集中豪雨が発生した際、自分たちの居住地域においてどのように雨水が拡散浸水していくのかパソコンの画面で確認できる。その結果、どのような場所が浸水し易く、危険なのかを知ることができる。また、

災害時の避難開始時期の判断，避難場所や避難ルートの確認ができるので，ソフト防災教育教材として活用できる．さらに，3章でも示したハード防災対策効果の確認機能を活用すれば，ハード並びにソフト両面を考えた防災・減災の大切さを効果的に教育できる教材開発が可能になる．

集中豪雨シミュレーションシステムを活用すれば，**図-7**と**図-15**に示した時間経過毎のシミュレーション結果を表示することができる．そのため，アニメーション機能でシミュレーション結果の画像を切り換えることにより，時間経過毎の浸水状況を比較することができる．また，時間雨量が違う場合においても同様に同時に比較することができ，非常に理解しやすい教材となる．

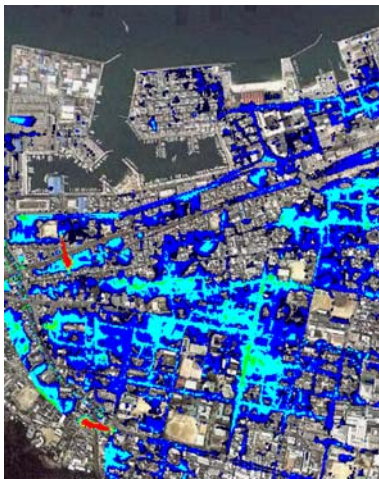


図-15 60分後の浸水シミュレーション結果

4. おわりに

平成21年7月の中国・九州北部豪雨災害，同年8月の兵庫県西・北部の豪雨災害と毎年のように台風および前線による豪雨災害が発生している．また，地球温暖化が一因とも言われている局地的集中豪雨（通称ゲリラ豪雨）による災害が各地で発生しており，今後増加する可能性が高い．被害の特徴をみると，避難所への避難途中で増水した川や側溝に流され死亡に至る事故が発生している．また，避難所が低い地形のところであり避難所が危険な場所になっており被害が拡大したケース，自分の住んでいるところが地形的に土石流や土砂災害の被害を受けやすい場所であることを知らず被害が拡大したケース等が報告されている．

最近の豪雨災害を見ると，災害発生時の避難の在り方とともに常日頃から災害特性，災害に対する地域特性を把握して対応方法を地域で検討しておくことの重要性を再認識させられる．このような現状をみると，

防災教育の重要性が改めて認識される．本研究で開発したシミュレーションシステム並びに地域の防災力の向上を図るためには，

本稿で紹介した防災教育用教材の充実は急務であり，各地においてこれらの教材を活用した防災教育の実施が望まれる．

本研究で得られた主な成果をまとめると以下のようになる．

(1) 高松市二番丁を対象として，セルオートマトン法を用いて雨が降る地上空間のモデル化，降った雨が時間の経過とともに地上空間を拡散していくルールを設定を行い，時間雨量50mm及び100mmの集中豪雨シミュレーションシステムを構築した．

(2) (1)で構築したシミュレーションシステムをハード防災対策に活用するために，シミュレーションシステムにさらに土嚢による止水機能及びポンプによる排水機能を付加して，ポンプおよび排水溝による排水効果を検証した．

(3) 集中豪雨災害に対する防災教育教材はほとんどないのが現状を踏まえ，(1)で構築したシミュレーションシステムを活用した教育教材を開発した．具体的には，雨水拡散シミュレーション教材ソフトの開発を行い，地域の防災特性（脆弱性）の把握を可能にする教材を開発した．

なお，本研究は，社団法人四国建設弘済会の「平成20年度建設事業に関する技術開発支援制度」並びに文部科学省の「平成20年度，21年度防災教育支援事業」の助成を受けて実施したものである．この場を借りて関係各位に御礼を申し上げる．

参考文献

- 1) 日立製作所：洪水シミュレーターDioVISTA/Flood Simulator, 日立製作所ホームページ,
<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2006/06/0602.pdf>
- 2) 国土技術政策総合研究所：NILIM2.0 都市域氾濫解析モデル, 国土交通省国土技術政策総合研究所ホームページ, <http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/nilim/index.html>
- 3) 加藤恭義・光成友考・築山洋：セルオートマトン法—複雑系の自己組織化と超並列処理—, 森北出版株式会社, 1998年.
- 4) 国土交通省国土計画局：国土数値情報, 国土交通省国土計画局GISホームページ, 入手先
<http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/gis/index.html>.
- 5) 佐々木整：本格学習 Java 入門, 技術評論社, 2004年.

(2010.5.28 受付)