

## IoT を活かした都市型洪水緩和システムの開発と運用\*

笠井 利浩<sup>\*1</sup>, 豊岡 佑馬<sup>\*2</sup>

### Development and Operation of an Urban Flood Mitigation System Using IoT

Toshihiro KASAI<sup>\*1</sup> and Yuma TOYOOKA

<sup>\*1</sup> Department of Environmental and Food Sciences

In this research, we developed an urban flood mitigation system that makes use of IoT. This system uses the prediction results of high-resolution precipitation nowcasts by the Japan Meteorological Agency. As a result, before the heavy rain begins, the water level in rainwater reservoirs can be controlled to relieve floods. Since a computer automatically controls this system, performance as a flood mitigation system is maximized. In this paper, we introduce the urban flood mitigation system developed by the authors. We also report on the results of operation of this system.

**Key Words** : Rainwater Harvesting System, Urban Flooding Mitigation, IoT

#### 1. 緒 言

近年, 地球温暖化の影響でゲリラ豪雨が頻発している. また, 都市部では地表がアスファルトやコンクリートで舗装され, 水を浸透, 吸収することができないため洪水が起りやすくなっていることから, さらに大きな問題になっている. 現在, その対策として調整池の設置や大型施設の地下に貯留槽を埋設するなどの措置が取られているが, ゲリラ豪雨の発生回数が年々増加傾向にあるため<sup>(1)</sup>, 洪水を抑制しきれていないのが現状である. その対策の一つとして, 豪雨のピーク流量を一時的に受け止めて洪水抑制効果を発揮する雨水貯留施設の導入が挙げられる. このような背景から, 過去に戸建住宅向けの雨水貯留槽を用いた都市型洪水緩和システムの研究が行われている. 雨水貯留槽の空き容量部分を, そのまま豪雨のピーク流量抑制に利用するという研究<sup>(2)</sup>や雨水管理システムとして自動開閉バルブ付の雨水貯留槽を用い, 積極的に貯留槽内の雨水を排水して豪雨時のピーク流量カットの効果を高める装置を提案している<sup>(3)</sup>. しかしながら, 前者のシステムは貯留槽に空き容量が少ない場合, 洪水緩和装置としての性能を十分に発揮できないという問題がある. 一方後者は, 行政が都市内の貯留槽を一括管理する大掛かりなシステムであり構築に時間を要するという問題がある.

本報では, 容量に制限のある戸建住宅用雨水貯留槽の水量制御に, 気象庁が提供する高解像度降水ナウキャストの降雨予測を使用した都市型洪水緩和装置を提案・開発した. システム構築後から連続的に高解像度降水ナウキャストの降雨予測データやシステム稼働状況を記録しており, そのデータを基に本システムの有効性と今後の課題について検討する.

#### 2. 都市型洪水緩和システム

雨水貯留槽を用いた都市型洪水緩和システムのイメージ図を, Fig. 1に示す. この都市型洪水緩和システムは, 高解像度降水ナウキャストの画像をプログラムで5分ごとに解析し, 豪雨が予想される場合には, 貯留槽内の雨水

---

\* 原稿受付 2017年2月28日

<sup>\*1</sup> 環境情報学部 環境・食品科学科

<sup>\*2</sup> 工学部 経営情報学科

E-mail: kasai@fukui-ut.ac.jp

を事前に排水する．その後，降雨を貯留槽内に溜めることで洪水被害を軽減する装置である<sup>(4)</sup>．

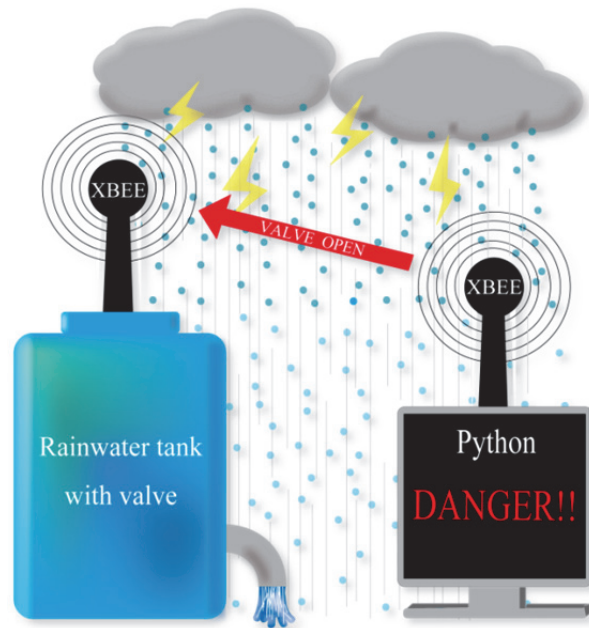


Fig. 1 Urban flood mitigation system at the rainwater harvesting system

## 2.1 システムの構成要素

都市型洪水緩和システムを構成する主な装置は，以下の通りである．

### ・高解像度降水ナウキャスト

高解像度降水ナウキャスト（Fig. 2）は，気象レーダーの観測データを利用して，250m解像度で降水の短時間予報を提供するシステムであり，現在の時刻から1時間先までの降水情報を5分毎に予測して描画している．降水量によって色分けされ，降水量が20mm/hを超える場合は黄色で表示される．30mm/hでは橙色，50mm/hでは赤色，80mm/hでは紫色で表示される<sup>(5)</sup>．

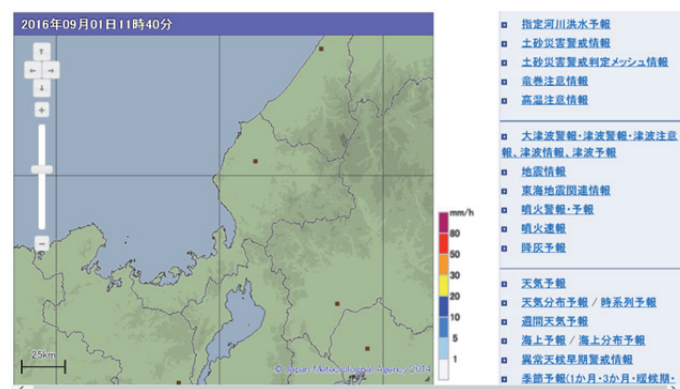


Fig. 2 High-resolution precipitation nowcasts screen around Fukui city

### ・開発環境

開発した雨水排水制御プログラムには，Python言語を採用した．Pythonとは，オブジェクト指向スクリプト言語であり，ソースコードの書き方に関するルールが厳密で，ルールに従うことで簡潔で見やすいコードを書くことができる言語である．Pythonの特徴に標準ライブラリが豊富な点がある．ライブラリには拡張性があり，今回

はPython Imaging Library（以下PIL）とNumPY, PySerialの3つを主に用いた。PILは、画像ファイルを読み込み、操作、保存など画像データを扱うための機能をひとまとめにしたライブラリである。NumPYは、距離計算や配列などの数値計算を効率的に行うことができる数学関数ライブラリである。PySerialは、Pythonからシリアルポートを使えるようにするためのライブラリである。これによって無線通信を行えるようになる。開発環境として、OSにはUbuntuを使用した。UbuntuとはLinuxディストリビューションの1つであり、無償で提供されているOSの1つである<sup>6)</sup>。

#### ・XBee

XBee (Fig. 3) とは、近距離無線通信をするためのZigBee通信モジュールである。ZigBee通信とは、センサーネットワークを主目的とする近距離無線通信規格の一つである。この通信規格は、転送可能距離が短く転送速度も非常に低速である代わりに、安価で消費電力が少ないという特徴を持つ。XBeeは近距離での通信を想定しているが、Pro版は10mWと出力が大きく、設置されている地上高が低くても見通し環境において最大1.5kmもの距離での通信が可能である。今回用いたのは、PRO版のXBee PRO S2Bモデルである<sup>7)</sup>。



Fig. 3 XBee PRO S2B wireless communication module

#### ・Arduino

Arduino (Fig. 4) とは、AVRマイコン、I/O（入出力）ポートを備えた基板、C言語風のArduino言語による統合開発環境から構成されたシステムである。Arduinoには「センサーなどの部品をつなげる部分」や、「プログラムを開発し、部品へ書き込むための開発用ソフトウェア」などが用意されており、PCとArduino、そして、部品があれば電子工作を試すことができ、電子工作やプログラミングの初心者でも簡単に扱うことができるマイコンボードである<sup>8)</sup>。本研究では、無線信号を受け取り、電磁バルブの制御や貯水率を確認するために使用した。また、Arduinoには受信用XBee搭載するためのArduinoワイヤレスプロトシールドを搭載した。



Fig. 4 Arduino

#### ・電磁バルブ付雨水貯留槽

電磁バルブ (Fig. 5) は、電磁石の磁力を用いて弁を開閉する仕組みを持つもので、流体を通す管での流れの開閉制御に用いられる。雨水貯留槽 (Fig. 5) には、容量 $2\text{m}^3$ のものを使用した。貯留槽内にはフロートスイッチを使用した水位計が設置されている。そのフロートスイッチのフロート (浮き) が水位の上下によってON/OFFが切り替わり、ArduinoでフロートスイッチのON/OFFを読み取って水位を判断している。



Fig. 5 Rainwater tank with a solenoid valve

#### ・見える化システム

今回、開発した見える化システム (Fig. 6) は、ディスプレイにリアルタイムで更新されるナウキャスト画像と、その画像の時間、貯留槽内の貯水率、SAFEあるいはDANGERかを常時表示するシステムである。

このシステムは、紙芝居やパラパラ漫画などと仕組みが同じであることに気づき、アニメーションなどを作成できる `pygame` を用いた。 `pygame` とはゲームを製作するためのライブラリである。このライブラリのアニメーションを作成する仕組みを応用して見える化システムを開発した。プログラム内で行われている処理を以下に説明する。まず、表示するウィンドウのサイズとタイトルを設定する。次に、雨水貯留槽水量制御信号発信プログラムにより保存される画像を読み込み表示する。この作業を毎秒繰り返す。これによって、自動更新されない気象庁のサイト内の高解像度降水ナウキャストの画像が、自動更新をされるようになり、リアルタイムの画像を確認することができるようになった。

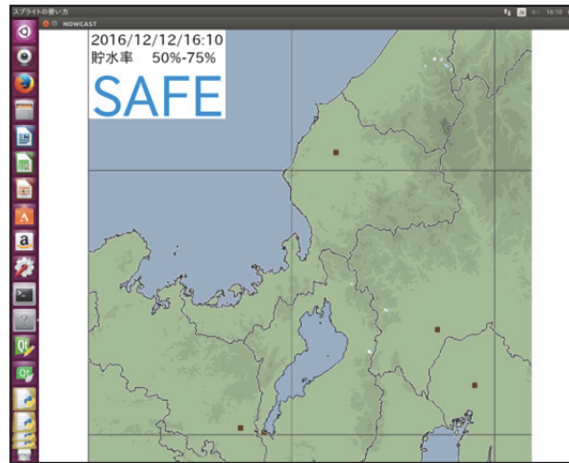


Fig. 6 Visualization system screen of urban flood mitigation system

## 2.2 プログラムの内容

都市型降水緩和システムのプログラムのフローチャートを、Fig. 7に示す。

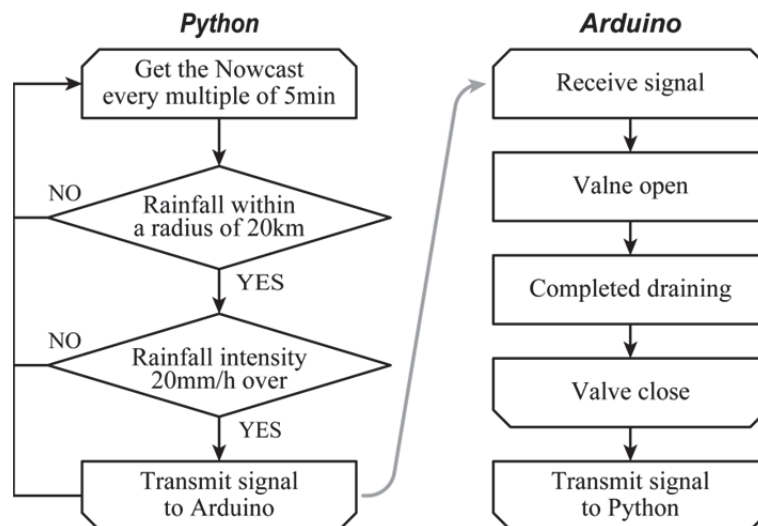


Fig. 7 Flowsheet of the urban flood mitigation system program

以下にPythonとArduinoそれぞれの処理の流れを示す。

### ・ Python

プログラムを起動させると同時に現在時刻を取得し、時間の分部分が5の倍数（例1:15, 2:20など）になるまで待機する。分が5の倍数の時刻になると、高解像度降水ナウキャストのサイトにアクセスし、ナウキャスト画像を取得する。得られた画像は、色を数字に変換して数値データ化（白1: 1mm/h, 薄水色2: 5mm/h, 水色3: 10mm/h, 青4: 20mm/h, 黄色5: 30mm/h, 橙色6: 50mm/h, 赤7: 80mm/h, 紫8: 80mm/h以上）する。本システムが設置されている福井工業大学の場所に該当する座標から、半径20km以内にあたる数値データの中に5以上の数字があった場合には、PC画面上にDANGERと表示する。DANGERの場合、数字の大きさに合わせてDANGERの後に付く！マークが増える（5: 1つ, 6: 2つ, 7: 3つ, 8: 4つ）仕様にした。一方、4以下の場合はSAFEと表示する。また、ArduinoにはXbeeを使って数字が4以下なら0, 5なら1, 6なら2, 7なら3, 8なら4を無線送信する。それと同時に送信した時の時間と、SAFEかDANGERかの判定を保存する。その後、Arduinoから送られてきた貯留槽内の水量についても同様に保存する。Pythonでは、以上の動作を繰り返す。



## ・ Arduino

Arduinoでは、Pythonから送られてくる数字を読み取り、その数字が0なら貯留槽内の水量を送信し、1なら貯留槽内の雨水が1/4排水されるまでバルブを開放する。2なら1/2排水、3なら3/4排水、4なら全て排水し終わるまでバルブを開放する。30分経過しても排水し終わらない場合は30分経過後自動でバルブを閉じるようになっている。それ以降は0と送信されてくるまでは1~4の数字が来ても排水せずに水量を送信するだけの状態となる。0が受信されるとその状態が解除され、また1~4の数字を受信すると排水を行うようになる。

## 3. 結果および考察

Fig. 8は、PythonプログラムによりDANGERと警告が出ているときのナウキャストの画像とその時の福井気象台の降水量データをまとめたものである。5時40分に30mm/hの雨が降っており、その30分前に大雨を予測し警告を出している。

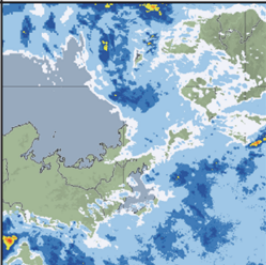
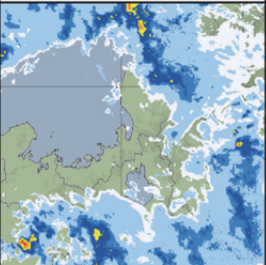
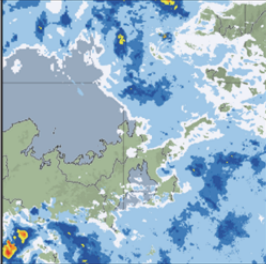
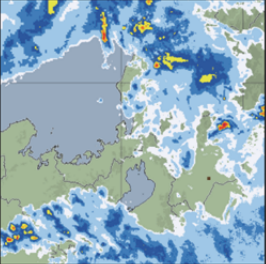
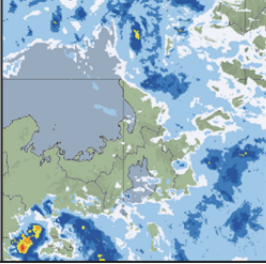
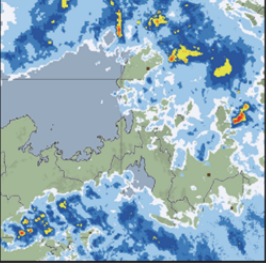
Time	Nowcast picture	Pricipitation (mm) / 10min ( /1h )	Time	Nowcast picture	Pricipitation (mm) / 10min ( /1h )
5:10		0.0 (0.0)	5:40		5.0 (30.0)
5:20		1.0 (6.0)	5:50		1.0 (6.0)
5:30		2.5 (15.0)	6:00		0.5 (3.0)

Fig. 8 High-resolution precipitation nowcasts image and precipitation around Fukui city (2016/9/18/5:10-6:00)

Pythonで取得した高解像度降水ナウキャストの画像を、Fig. 9に示す。この画像は、2016年8月29日17時の福井の降水状況を表した画像である。同時刻の電磁バルブ付雨水貯留槽の画像を、Fig. 10に示す。大雨が降りだす前に雨水を排水することができている。

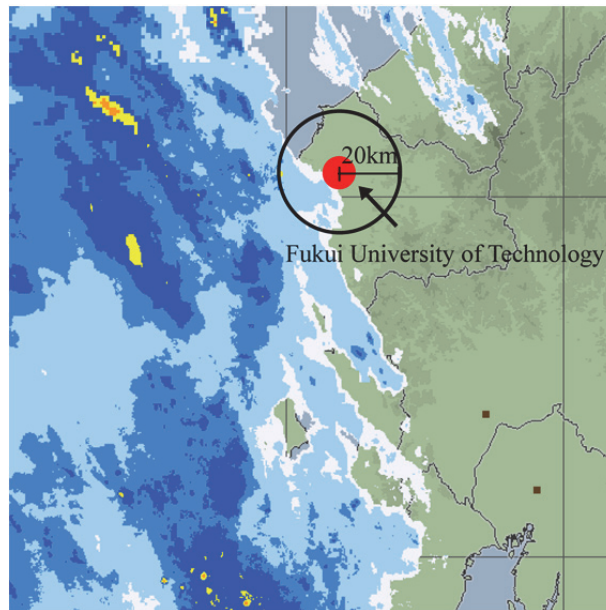


Fig. 9 Rainfall around Fukui city (2016/8/29/17:00)



Fig. 10 Drainage from rainwater storage tank

次に、9月5日10時30分の高解像度降水ナウキャストの画像を、Fig. 11に示す。この日は事前に雨水を排水することに成功しているが、この後20mm/h以上の雨が降ってくることはなかった。原因は、Pythonのプログラムで大雨が一定距離内に近づいているということは判断できるが、どういう軌道で雨雲が近づいているかは判断することができないからだと予想される。

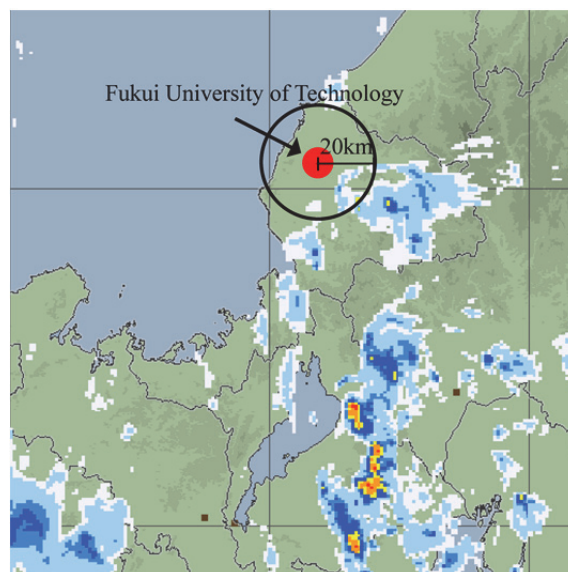


Fig. 11 Rainfall around Fukui city (2016/9/5/10:30)

データログをもとに作成した貯留槽内水量の推移と10分毎の降水量（地域気象観測システム（AMeDAS）、福井観測所10分値データ、0.5mm単位）を表したグラフをFig. 12に示す。折れ線グラフは貯水率、棒グラフは降水量を表している。10月17日の2時にプログラムにより大雨が近づいていると判断したため、排水を始め、2時20分に排水を終了してバルブを閉じて貯水を開始した。その後、やや強度を増した降雨によって2時50分まで貯水量が増加している。次に貯留槽内水量が増加するのは、3時30分から4時にかけての時間帯であり、特に降雨強度が大きくなっていることから、流出抑制効果を発揮していることが分かる。一方、3時から3時30分の時間帯には、データ上に降雨があるにも貯留槽内の水量は増加していない。これは、集水面と貯留槽の間に設置した初期雨水除去タンクの影響によるものである。この初期雨水除去タンクは、降り始めの大气中の塵埃等によって汚染された初期雨水や屋根面から流れ込む砂分が貯留槽に入る量を減らすためのものであり、約300Lの容量がある。集水面で集められた雨水は、一度このタンクに入り、タンクが満水になった後に貯留槽に雨水が流入するようになっている。また、このタンクの底部には、次回降雨までにタンクを空にするための小径の排水口が設置されており、0.5mm/hの降雨によって流入する雨量程度の水量が常時流れ出すようになっている。この仕組みによって、この時間帯には貯留槽に雨水が流れ込まなかったため、貯留槽の水位は増加しなかったと考えられる。

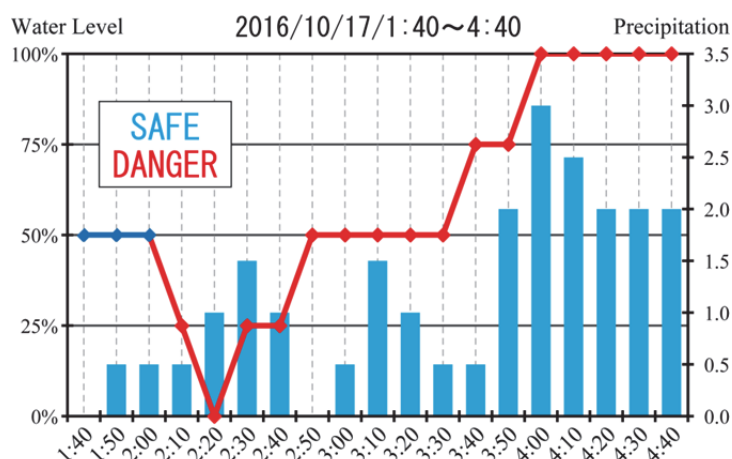


Fig. 12 Relationship between the changing water level of the rainwater tank and precipitation

Table 1に示す表は、10月6日から翌年1月30日まで記録してあるログの一部である。容量の欄に一部欠けているところがある。これは、無線通信がうまくいかずArduinoへ信号が届かなかったか、Arduinoから送信される信号



を受信することができなかったためである。通信精度を求めるために、これをもとに通信成功率を出した。送信回数は、69325回であった。通信成功回数は61411回であった。そのことから、通信成功率は88.58%と求められた。他にもRSSI値を調べて電波強度を求めた。XBEEには、ATコマンドという機能があり、ATコマンドを送信することで、設定値の変更や読み取りができる。ATDBと送信すると1A～5Cの16進数で値が返ってくる。実際に値を読み取ったところ34という値が返ってきた。10進数に直すと52となる。よって、RSSI値は-52dBmということが分かった。目安としては、-60より大きい値（0～-60）であれば強度良好であり、-80以下では電波が弱い<sup>9)</sup>と判断されるため、電波強度については良好であることが分かった。このように、電波強度は良好ではあるものの通信成功率が100%にならなかった理由は、ATコマンドを使って電波強度を測定した時の状態が、常時保持されていないことが考えられる。考えられるケースとして、本システムが設置されている前の駐車場に駐車された車の影響などが考えられる。今後の対策として、アンテナの設置場所の変更等を検討し、100%に近い通信成功率を目指す必要がある。

Table 1 Communication log

Forecast time	Decision	Quantity	Forecast time	Decision	Quantity
201610091800	SAFE		201610091850	SAFE	100%
201610091805	SAFE		201610091855	SAFE	100%
201610091810	SAFE	100%	201610091900	SAFE	100%
201610091815	SAFE	100%	201610091905	SAFE	100%
201610091820	SAFE	100%	201610091910	SAFE	
201610091825	SAFE	100%	201610091915	SAFE	
201610091830	SAFE	100%	201610091920	SAFE	100%
201610091835	SAFE		201610091925	SAFE	100%
201610091840	SAFE	100%	201610091930	SAFE	100%
201610091845	SAFE	100%			

#### 4. 結 言

本研究では、ナウキャスト画像を解析することで降雨予測を行い、福井工業大学から一定距離内に大雨が接近していた場合、電磁バルブ付雨水貯留槽へ無線で信号を送信し、雨水を排水することで洪水緩和を行うシステムを開発した。このシステム開発において、ナウキャストを用いた貯留槽内の水量制御、信号送受信およびデータロギング、フロートスイッチを使った水位計による水量確認、降雨状況の見える化を可能とした。

上述の都市型洪水緩和システムの運用結果、性能評価からこのシステムが洪水緩和に有効であることが分かった。今後の展望としては、降雨予測の精度を向上させること、複数の貯留槽を同時に制御できるようにすること、降雨強度に応じた排水量の最適量を求めることがあげられる。これらすべてを達成することで、このシステムの洪水緩和効果を最大化することができるであろう。

#### 文 献

- (1) 気象庁, “アメダスで見た短時間強雨発生回数の長期変化について”, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html>(2016/9/28).
- (2) 越川康夫・村川三郎・西田勝, “雨水利用システムにおける雨水利用効率と都市型洪水防止効果の検討”, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 452(1993), pp.37-45.
- (3) 奥山吉寛, “雨水管理システム”, 公開特許公報(特開2006-029045).
- (4) 笠井利浩・中城智之・前川翔太, “雨水活用装置を用いた都市型洪水緩和システム”, 福井工業大学研究紀要(2014), pp. 178-184.
- (5) 気象庁, “高解像度降水ナウキャストとは”, [http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/highres\\_nowcast.html](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kurashi/highres_nowcast.html)(2016/8/18).
- (6) 廣井誠, “お気楽 Python プログラミング入門”, [http://www.geocities.jp/m\\_hiroi/light/python01.html](http://www.geocities.jp/m_hiroi/light/python01.html)(2016/9/20).

- (7) 森下功啓, “XBeeとは?”, <http://morimori2008.web.fc2.com/contents/XBee/overview/xbec.html>(2016/8/18).
- (8) 生座本真, “Arduinoとは何か?を調査してみた”, <http://www.japanese-makers.com/archives/656>(2016/8/18).
- (9) 株式会社バッファロー, “無線環境が安定するRSSI強度”,  
<http://network-e.seesaa.net/article/239797014.html>(2016/11/22).

(平成 29 年 3 月 31 日受理)