

2018 年度（第 54 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 18-A-5

IoT-DRR とグリーンインフラ

福岡工業大学・教授

森山聡之

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2018 年 9 月

IoT-DRR とグリーンインフラ

IoT-DRR and Green Infrastructure

森 山 聡 之、 田 浦 扶 充 子、 寺 村 淳

Toshiyuki MORIYAMA, Fumiko TAURA, Teramura JUN

森 下 功 啓、 和 泉 信 生、 池 松 伸 也

Katsuhiko MORISHITA, Shinobu IZUMI, Shinya IKEMATSU

浜 田 晃 規

Teruyuki HAMADA

1. はじめに

近年、海水面の上昇が続き、九州でも平成 29 年 7 月九州北部豪雨、平成 30 年 7 月西日本豪雨と立て続けに大きな災害に見舞われており、この傾向が今後も続く想定して防災対策を行う必要がある。

これに対し、「あまみず社会」の実現を目指してグリーンインフラ（GI）や IoT-DRR による研究開発と社会実装が進んでいる。2009 年に発生した中国・九州豪雨時に福岡市の市街地を流れる樋井川が氾濫したことをきっかけに結成された樋井川治水市民会議（以下市民会議）と、市民会議が 2015 年に発展的解消し、新たにスタートしたあまみず社会研究会とミズベリング樋井川の取り組み例である。

あまみず社会とは、「都市の流域すべての場所で水の貯留・浸透を良質な緑を増やしながらか多世代が協力し、適正な技術と節度ある生活感覚に基づく、分散型の水管理が実現される持続的で豊かな地域社会」と定義される（図 - 1）。多機能の「水」を対象に、近代社会の共通の課題解決手法としての自立分散型の社会、エコロジカルな社会、協働型の社会として「あまみず社会」という都市ビジョンを描き、従来型の水システムを有する社会から「あまみず社会」へと社会変容が持続的に起こることを目標とする。

一部が破綻すると全体に影響を及ぼす従来のシステムと比べ、地震時などの危機時あるいは人口減少社会の中の維持管理に優れ持続性が高い、多目的・分散型・自立型の水管理である。さらに雨水を貯め、使う過程で、流域内の生態系を豊かにし、緑を増やし、多様な世代、主体が協力し、次世代へとつなぐ物語をつむぐことができる。

あまみず社会

雨水は貯留や浸透させ、一挙に地下・川に入れな分散型の水管理。水と緑による有機的な社会。

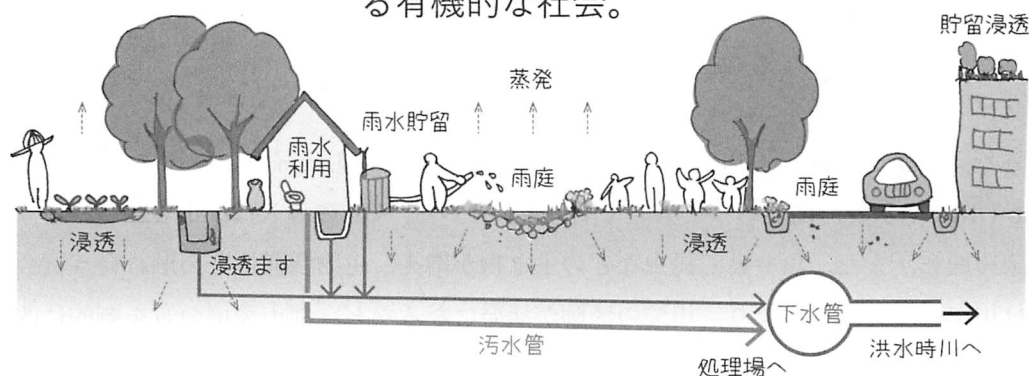


図 1 あまみず社会の概念図

それを実現する手段の1つとして IoT (Internet of Things: 物のインターネット) が普及してきた。IoT はセンサーによる観測やアクチュエーターによる操作が極めて安価で可能になってきた。このセンサーやアクチュエータを接続し、観測したデータを送ったり、制御のための指示を受け取ってアクチュエータに動作させるノードと呼ばれる装置を用いる。さらにノードからデータを受け取りインターネット経由で、クラウドに送ったり、クラウドからの指示をノードに伝えるゲートウェイ (以下 GW) と呼ばれる装置を使用する。さらに、クラウドでは受け取ったデータをデータベースに保存し、何らかの計算処理を行い、さらに Web やスマートフォン (以下スマホ) のアプリケーションソフトウェア (以下アプリ) に表示させ、逆に Web やスマホ、あるいは自動処理で指令を GW を経由してノードに送る。

この IoT 技術を用いて、災害リスクの削減 (Disaster Risk Reduction : DRR) を行うことを IoT-DRR と呼んでいる。

IoT-DRR は非常に多岐にわたる可能性を秘めているが、本講では、IoT センサーによる

(1) 河川水位のモニタリングと予測

(2) 雨水タンクと雨庭のモニタリ

ングについて紹介する。

さらに、近年では、グリーンインフラ (GI) という言葉も聞かれるようになってきた。GI は生態系等を利用したインフラであり、生物だけでなく土壌も有効に活用しようというもので、従来のインフラがコンクリートを主体にしたもので、対比してグレーインフラと呼ばれている。本講では GI による流出抑制のシミュレーション例を紹介する。

2. IoT とは

IoT は最近作られた言葉であるが、水工系の方々は各種センサーや各種制御装置をインターネットで接続することはかなり古くから行って来たので、何を今更と思われる方々も多く居られると思う。筆者も最初は同様の感想であった。しかし、IoT が盛んになると、5 万円程度していたセンサーノードが数千円に下落し、エネルギーも省消費電力になり、無線接続も無線 LAN (以下 WiFi) のような高速だが消費電力が多く伝送距離が短いものから、低速だが消費電力が少なく伝送距離が長い LPWAN と言われる各種の方式が普及を始め、大幅なコストダウンが可能になってきた。これに引きずられるように、スマホでの使用を選定とし大量生産された安価なセンサーも登場している。

以上の IoT のデバイスの状況を活用することで、10 年前のコストの 1/10 以下で、容易に IoT が行えるようになってきた。ソフトウェアに関しても、標準的なノードとして簡単なプログラムを動作させる CPU 基板を採用し、GW として Linux が動作する CPU 基板を使用するのが標準的になってきた。

3. グリーンインフラとは

グリーンインフラ (以下 GI) とは、生態系 (自然) を利用したインフラのことで、これを防災に活かす Eco-DRR や水質浄化といった場面で期待されている。GI の導入は都市の緑の増加、ヒートアイランド現象の緩和、また、魚や鳥、昆虫などの生き物が増え、生物多様性との触れ合う機会が増加する。子どもは川で遊べるようになり、川での活動が活発になるなど、都市環境の質を劇的に改善されると考えられる。今回は雨庭や雨水浸透施設等の自然の浸透力を利用して洪水を防ぐという取り組みを紹介す

る。

4. IoT-DRR の詳細

4.1 センサー

センサーは目的に応じて使用するデバイスを選択する。例えば 80cm 以下の水深を計測するには、eTape などのセンサーで水位に比例した電圧が出るので、これをセンサーノード搭載の AD 変換デバイスで変換するか、シールド等に搭載した AD 変換デバイスを用いる。それ以上の深さの場合、超音波水位センサーの中には電圧だけではなく、シリアル回線や I2C と呼ばれる回線を介して文字の形で出力するものもあり、計測が容易になってきている。流量センサーや雨量計に見られるようなカウント方式のものは意外と厄介である。原因はセンサーノードを省電力化のためスリープさせると、カウント値を忘れるので時間管理やデータの保存が必要となる為である。

4.2 センサーノード

センサーノードはセンサーからのデータを取り込む機能と、それを GW に向けて送信する機能が必要である。また設置される場所が商用電源が確保されない場所である、災害発生時の停電にも関わらず動作する必要があるなど、独立電源でかつできる限り省電力であることが求められる。

センサーノードによく使われる Arduino は、Atmel 社の AVR マイコンである ATmega328P あるいは類似品をベースとする CPU を搭載した基板であり、多くの Arduino コンパチブルなソフトと、シールドと呼ばれる外部拡張基板を接続することが可能であるものが多い。シールドも多くの種類が市販されていて、ある種のエコシステムをなしている。CPU 基板の仕様が全て公開されているため、多くの派生タイプが生まれている。

我々も初期のセンサーノードには Arduino Mega2560 などの純正に近いボードを利用していたが、連続動作をさせる為、商用電源が必須であった。そこで省電力化する為にはシステム全体をタイマーに合わせてスリープと起動を繰り返す Seeeduino Stalker V3.0 を採用した（図-2）。これにはリアルタイムクロック (RTC) や無線通信を行う XBee ソケットを搭載しシールドの電源も落とせる仕様になっているなど、多くの長所を備えている。

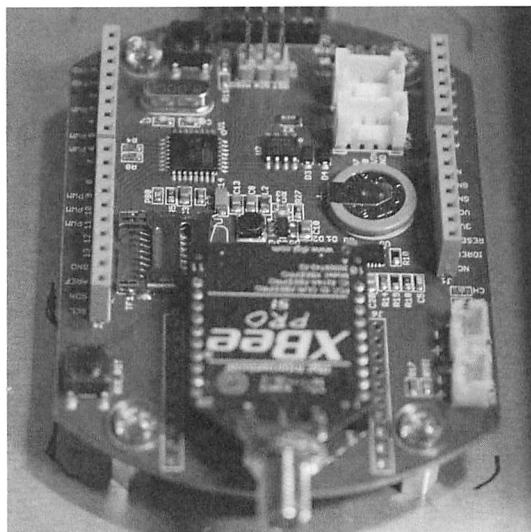


図-2 センサーノード：Seeeduino StalkerとXBeeの例。PANはZigBeeの一種であるXBeeを用いていた。初期の実証実験では、Arduino Mega 256を用いていたがRTCを内蔵するStalkerに変更し現在に至る。

Arduino のプログラムは C++ で記述し、Arduino IDE を用いてコンパイルとアセンブルを行って、USB ケーブルを介して Arduino/Stalker にプログラムを書き込んで動作させる。実際に 10 分ごとに水位のデータを取り込んで送信すると、しばらくは動作するが、数時間から数日後にフリーズする現象に遭遇した。そこで、ノイズによる障害を疑いノイズフィルター等を実装するとともに、フリーズを検出して再起動を行うウオッチドッグタイマー（以下WDT）を汎用シールド上に設置している。これにより安定動作するようになった。

しかし、現在は ATmega328P ではメモリ等の容量が小さく、複雑なプログラムを動作させるのは不向きのため、次世代の Arduino の利用を追求している。

4.3 アクチュエータ

アクチュエータはノードからの指示を受けて外界に働きかける動作を行うデバイスであり、我々のプロジェクトでは主に排水の為のポンプを制御した。ポンプは少し大きなものになると動作中に流れる電流も数アンペアと大きく、また起動時の突入電流も 10 数アンペアと大きいため、Arduino から直接制御できる小さなポンプは実用的ではなく、専用の回路かシールドを用いる必要がある。

4.4 ゲートウェイ (GW)

GW には通常マルチユーザマルチタスクで動作する Linux を OS として動作する Raspberry Pi を CPU 基板として使用する場合が多い。OS も各種あるが、Raspbian と呼ばれるディストリビューションが主に用いられる。こちらにも各種の拡張ボード等が販売されエコシステムを形成している。Linux のファイルシステムは、結構脆弱であるので、停止させる場合はいきなり電源断せず、シャットダウン動作をさせるのが普通である。電源が落ちた場合に備えて、小型の無停電電源 (UPS) を用い外部電源が落ちた場合でもシャットダウンする間の電源を保持させる。UPS には PicoUPS を用いている。また産業用のマイクロ SD カードを用い、できる限りファイルシステムの破損を防ぐことが推奨される。センサーノードからのデータは XBee を用いて受信し、USB ポートから Java を用いて取り込み、これを TCP/IP を介してクラウドへ送信する。Raspberry Pi とクラウドの間は、Ethernet, WiFi, 3G/LTE などの回線を用いてインターネット経由で送信する。セキュリティ上の問題を回避するため、クラウドと Raspberry Pi の間には OpenVPN を用いた暗号回線をソフト的に構築している。

なお、WiFi は USB ドングルが対応していれば容易に設定可能であるが、3G/LTE は USB ドングルごとに PPP 接続のためのダイアルアップ関連の設定が必要である。SIM はデータ従量制な SORACOM Air SIM を用いている。自作の GW の例を図 -3 に示す。

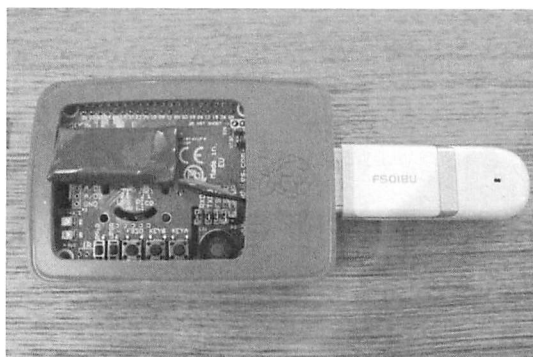


図-3 GW(Raspberry Pi+3G dongle)

GWは最初は表示装置と兼用するためAndroid Tabletを用いていたが、安価で専用のRaspberry Piに置き換えることでOpenVPNを介してセキュアに遠隔操作可能になった。また、安全にシャットダウンできるようにPicoUPSを付設している。携帯3G用のdongleでインターネット回線に接続することが可能である。

4.5 データ収集のためのデジタル回線

各種センサーの設置位置を自由にするためには、ワイヤレス化が必須であり、デジタル無線による伝送技術が重要になってくる。

4.5.1 WiFi の利用

当初は、センサーからのデータ収集でもパソコン同様無線 LAN(WiFi) が利用されたが、消費電力が常時6W と大きく、電源のワイヤレス化が困難であった。

4.5.2 ZigBee の利用

そこで、WiFi と同じ 2.4GHz の ISM バンドを用いる ZigBee に代表される PAN が注目された。データ伝送速度をある程度抑え、ZigBee のセンサーノード同士で中継し合うことで、広い面積をカバーするという謳い文句であったが、実際に使用してみると、数 10m と通信距離が伸びない、頻繁に切断されるという問題が明らかになってきた。これは実際には、WiFi との混信の問題や直進性が強く回折しない、植物により遮られやすいなどの原因があるようで、簡単に解決できないことがわかってきた。

4.5.3 LoRaWAN の利用

最近、回折しやすい 800-900MHz のプラチナバンドを用い、消費電力を低減する方式が登場した。最近では省電力で長距離データを伝送可能なLPWAN として、Sigfox やLoRaWAN が使われるようになってきた。これらは比較的帯域幅が狭いく低速である代わりに、長距離を省電力で伝送可能である。サブギガ帯 (Sub- GHz Band) の ISM バンドである 923MHz 帯や、もう少し低い 429MHz 帯あるいは 146MHz 帯で利用が可能とされている。これらは GHz 帯よりは回折しやすく建物をも割り込みやすいことから、プラチナバンドと呼ばれている。

LPWAN のうち、LoRa 変調による LoRaWAN を用い、雨水タンクのモニタリングで検証実験を行った。

LoRaWAN のサービスは、各社が競うようにサービスインのアナウンスを行っているが、日本で最初

にサービスインした SORACOM の Arduino シールド (図 -4) と GW (図 -5) を採用した。

LoRaWAN は ZigBee のように相互にセンサーノードが接続するメッシュネットワークは採用せず、スター型で各センサーノードが直接ゲートウェイに接続する方式である。通信距離は 10km 程度とされているが、実際に樋井川流域の住宅地で検証実験したところ、2階の住宅の屋根に設置した場合は近くの河川に超音波水位センサーを設置した場合 1.5km 程度の距離までデータ収集可能であった。通信用シールドは SORACOM の AL-50 を用い、SORACOM の専用 GW にデータ送信している。今回の実験では1台のセンサーノードはあまみずタンクの水位モニタリングのために同じあめにわ憩いセンターの敷地内に設置し、さらに3台の河川水位センサーノードを 1.5km 以内の樋井川上流域の橋に設置している (図 -6) 。

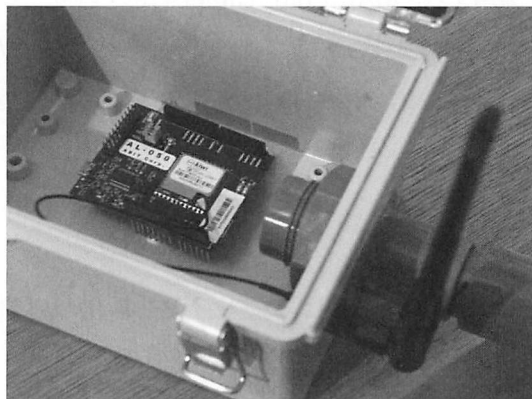


図-4 SORACOM LoRaWANシールドAL-050とアンテナ設置の様子Seeduo Stalkerは取り外している



図-5 あめにわ憩いセンターの屋上に設置したSORACOMの屋内用ゲートウェイ



図-6 実際に樋井川の橋に設置された超音波センサー利用の河川水位センサーノードの例

SORACOM の LoRAWAN の GW のモデルには、買取の占有モデルの他に、他のユーザーにも解放する共有モデルというユニークなモデルもあり、その分 GW の月額使用料も 1/3 程度に抑えられる。しかし、毎月の利用料は GW を数台抱えると結構な金額になるため、維持費がかさむという問題もある。多くのセンサーノードを設置すれば、1 台あたりの金額は安くなるので、GW のカバー範囲に多数のセンサーノードを置かないと意味がないだろう。

この IoT のためのクラウドは Amazon Web Service(AWS) を用いて構築している.

そこで、クラウドサーバをできるだけサーバレスにし、サービスとして利用することにした。GW から受信したデータは、AWS Lambda で受信し、DynamoDB に保存しつつ、Elastic Search と Kibana で Web に表示することにした。Elastic Search と Kibana を用いることにより、時系列データの期間を簡単に指定して表示可能であり、最新バージョンでは GeoJSON を用いると GIS のような表示も可能とアナウンスされている。図-7 にシステム全体の構成図を示す。

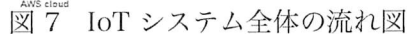
[illegible]

図-8 Elastic SearchとKibanaによるデータの時系列表示

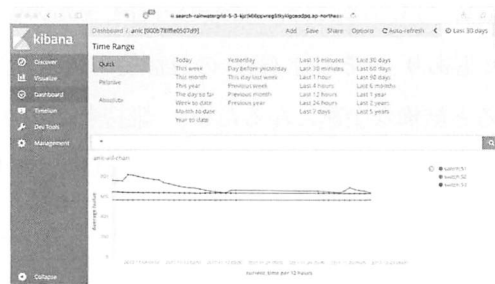


図-9 KibanaのQuick Searchの選択画面

4.7 河川水位の予測システム

河川水位の予測システムは、従来は雨量から流量に変換し流出量を推定し、それを水位に変換して計算していた。水位データは補助的に用いられ、水位から流量を行って検証に用いられている。

さらに、予測時間を延長したい場合には降雨予測を導入している。現業の国土交通省河川局や気象庁の予測は基本的にパラメタ固定で逐次同定予測などの手法は用いられていない。

しかし、この従来法は以下の問題が考えられる。

- (1) 降雨予測で予測誤差が少ないのは良くても 1 時間前で、それでも誤差は残る
- (2) 降雨→流出の変換は非線形であるため、誤差が残る
- (3) 水位→流量関係は履歴性（ヒステリシス）が存在し、誤差の原因となる逆に、
- (4) 水位の測定は雨の測定に比べると非常に精度が

高いという指摘もある。

上記の(1)～(3)の問題点は、

- 1) 水位 H と一意の関係にある流水断面積 A を予測に用いることにより水位 H → 流量 Q 変換の誤差を回避する
- 2) 予測降雨はできるだけ使わない。実測の降雨データを使う。予測のリードタイムを流域の到達時間以内にすることにより、精度の悪い降雨の予測が不要になる
- 4) 上流側の流水断面積 A を用いることで、降雨→流出量の非線形性の影響をできるだけ回避する
- 5) 逐次同定方式を用いることによりパラメタ固定の問題すなわち、降雨の観測誤差、降雨 - 流出量変換の非線形性をできるだけ回避する

ことにより軽減可能である。以下に具体的な方法を示す。

4.7.1 基礎式

降雨が上流側の水位観測地点 1 と下流側の水位観測地点 2 の間に存在しない場合は、上流側の水位を基に下流側の水位の変化量を予測する式は以下のようになる¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。

$$\Delta A_2 = A_2(t+I) - A_2(t)$$

$$\begin{aligned}
&= k\Delta A_1 \\
&= k\{A_1(t+I-\tau_{21})-A_1(t-\tau_{21})\}
\end{aligned} \tag{1}$$

ここに、 ΔA_1 ：上流側の水位観測地点における流水断面積、 ΔA_2 ：下流側の水位観測地点における流水断面積、 $k=(1-C_1)/(1-C_2)$ 、 $C_i=(L/2p)dK/dx$ 、 $K=N/(\alpha_A\sqrt{I_e})$ 、 p 、 α_A ：河道断面における特性値、 L ：上流側と下流側の水位観測地点の距離、 N ：マンニングの粗度係数、 I_e ：エネルギー勾配、 I ：予測のリードタイム、 τ_{21} ：2点間の到達時間である。

次に、現在時刻から現在時刻までの、第1の水位観測地点と第2の水位観測地点との間の降雨量の変化を流水断面積に変換したものを表すと、

$$\int_0^{t+I-\tau_s} U(\tau)r(t+I-\tau_s-\tau)d\tau - \int_0^{t-\tau_s} U(\tau)r(t-\tau_s-\tau)d\tau$$

である。ここに、 $U(\tau)$ ：時刻における単位図を倍したもの、 $r(t)$ ：時刻における有効雨量、s

$$m=\tau_{21}fL/(1+C_2), \quad f: \text{流出率である。}$$

したがって、2点間に降雨がある場合の下流側の水位の変化量は、

$$\begin{aligned}
\Delta A_2 = A_2(t+I) - A_2(t) &= k\{A_1(t+I-\tau_{21})-A_1(t-\tau_{21})\} \\
&+ \int_0^{t+I-\tau_s} U(\tau)r(t+I-\tau_s-\tau)d\tau - \int_0^{t-\tau_s} U(\tau)r(t-\tau_s-\tau)d\tau
\end{aligned} \tag{2}$$

となる。ここで、とおくことで、降雨予測が不要になり、であれば、の予測が不要になる。したがって式(2)は、

$$\begin{aligned}
\Delta A_2 = A_2(t+I) - A_2(t) &= k\{A_1(t+I-\tau_{21})-A_1(t-\tau_{21})\} \\
&+ \int_0^I U(\tau)r(t-\tau)d\tau - \int_0^{I-\tau_{21}} U(\tau)r(t-\tau_{21}-\tau)d\tau
\end{aligned} \tag{3}$$

となる。上式を離散化すると、

$$\begin{aligned}
\Delta A_2 = A_2(t+I) - A_2(t) &= k\{A_1(t+I-\tau_{21})-A_1(t-\tau_{21})\} \\
&+ \sum_{z=0}^I U(z)r(t-z) - \sum_{z=0}^{I-\tau_{21}} U(z)r(t-\tau_{21}-z)
\end{aligned} \tag{4}$$

である。この関係を図-10に示す。

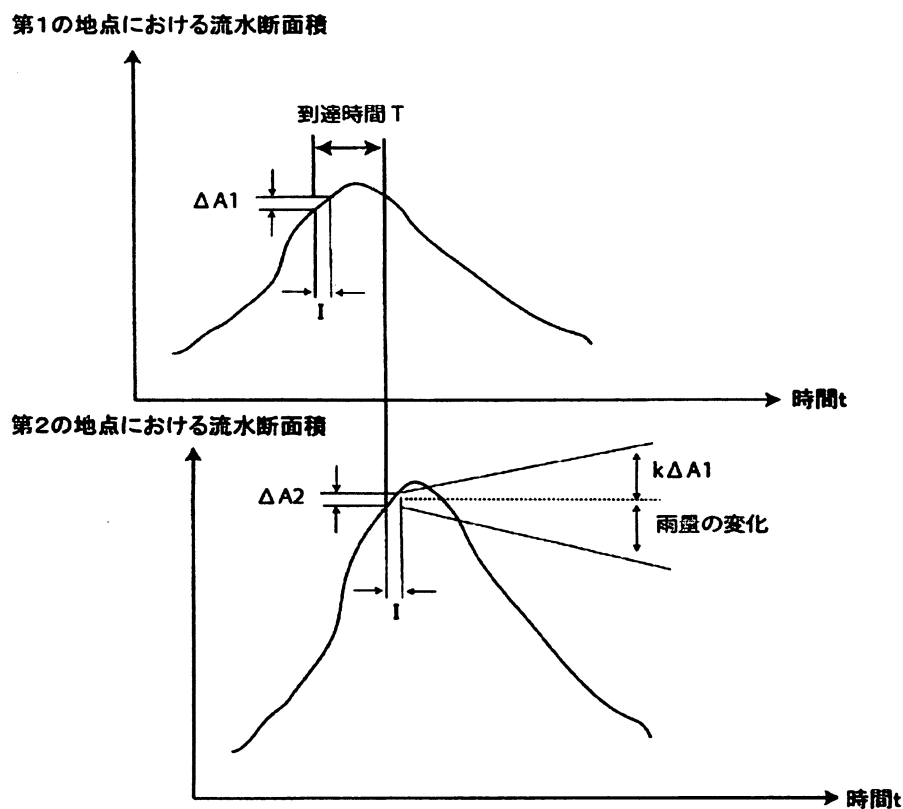


図 -10 上流側の水位変動から下流側の水位変動を予測する⁵⁾

ここでは降雨は補助的なものとして考えている。なお雨量→流量変換系の計算は任意の方法が使用可能である。単位図法、タンクモデル、あるいはRRIでも後述するような逐次同定でパラメータを操作できれば問題ない。ただし貯留関数法はパラメータが少なく精度が出にくいのでお薦めはしない。紹介した例では単位図法を用いている。

4.7.2 逐次同定法

逐次同定方式は各種考えられるが、ここでは通常の（線形の）カルマンフィルターを利用する。状態量は、水路の変形に伴うパラメータ k と、横流入の降雨→流出変換の単位図にレーダ定数をかけたパラメータ（複数）と想定し、これを下流側の水位の予測誤差が最小になるように逐次同定する。なお逐次同定方法はカルマンフィルターに限らず、粒子フィルターなど他のものでも構わない。今回の例は、計算機のフットプリントが256～640KByteと極めて小さかったため、カルマンフィルターを利用している。

4.7.2 水位観測点2点間における予測

以上を川内川で適用した。図-11に川内川の流域図を、1時間ステップの湯田と仙台の2点の水位データを用いて3時間先の予測を行った例²⁾を図-12に示す。比較のために、降雨のデータがない場合²⁾を図-13に示す。

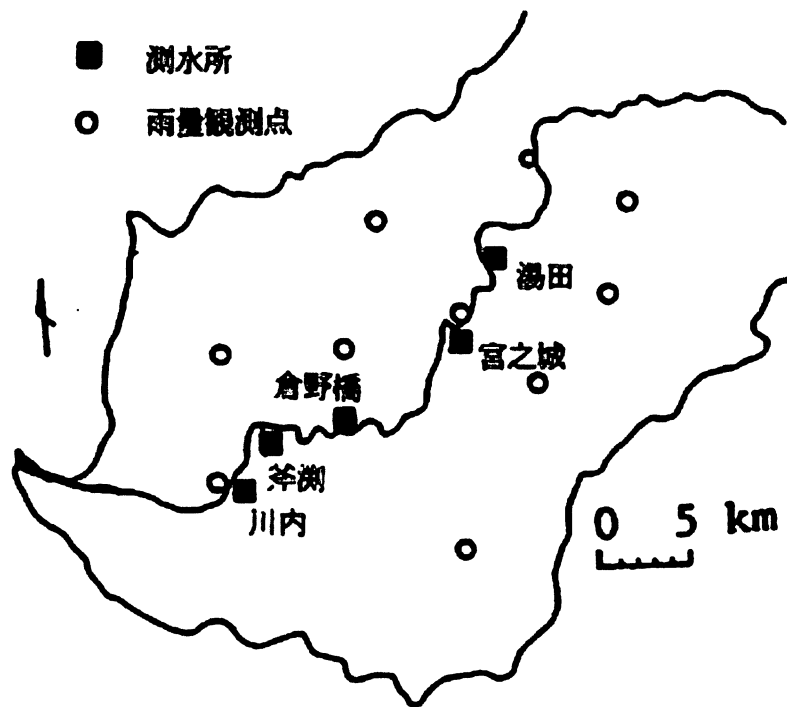


図-11 川内川流域図²⁾

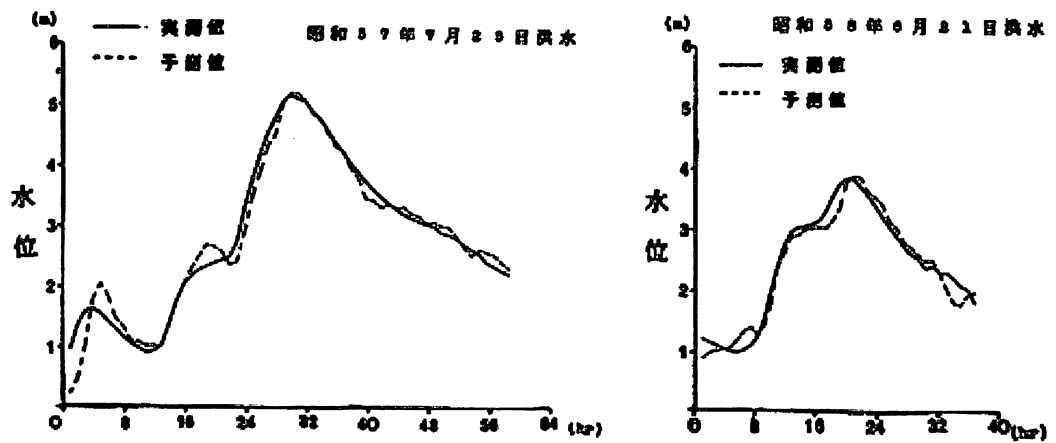


図4. 予測値と実測値の比較 ($\tau_S=3$ 時間, 2地点)

図 12 湯田ー川内間の2点間のデータを用いた予測結果²⁾

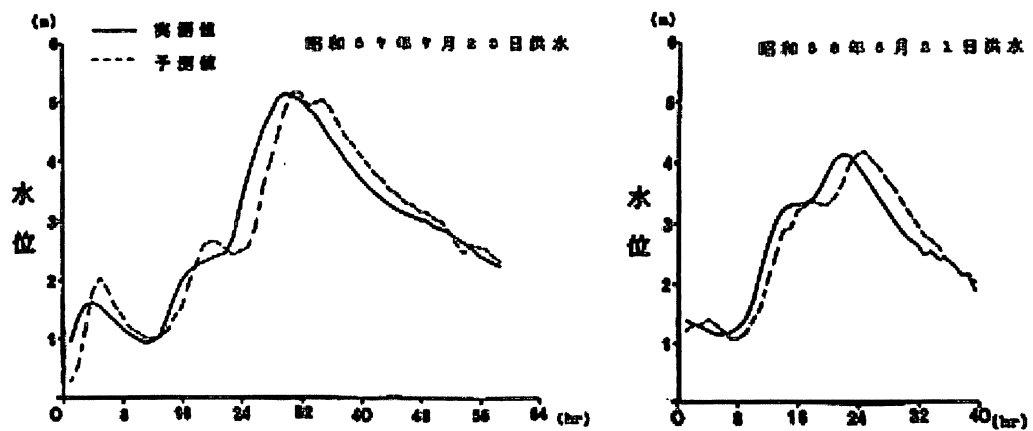


図5. 予測値と実測値の比較 (降雨無視, 2地点)

図 13 湯田ー川内間の2点間のデータを用いた予測結果 (降雨データ使用せず)²⁾

4.7.3 複数の直列の水位観測点間における予測

複数(n 個)の水位計が存在する場合は、式(4)を拡張して、複数の水位データを用いる。川内川の1時間ステップのデータを用い、湯田から川内までの5点間の水位データを利用して3時間先の予測を行った例²⁾を図-14に示す。降雨のデータが欠けて(図-14 右)も、降雨予測あり(実際には実測データ使用:図-14 左)と同じ程度に良い結果が得られた。

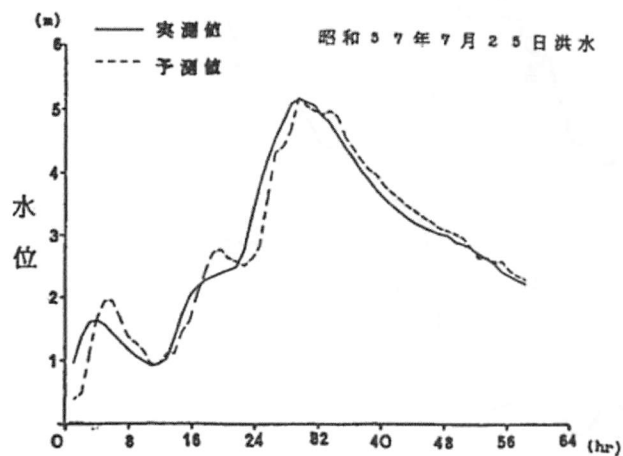


図7. 予測値と実測値の比較 ($\tau_S=3$ 時間, 5地点)

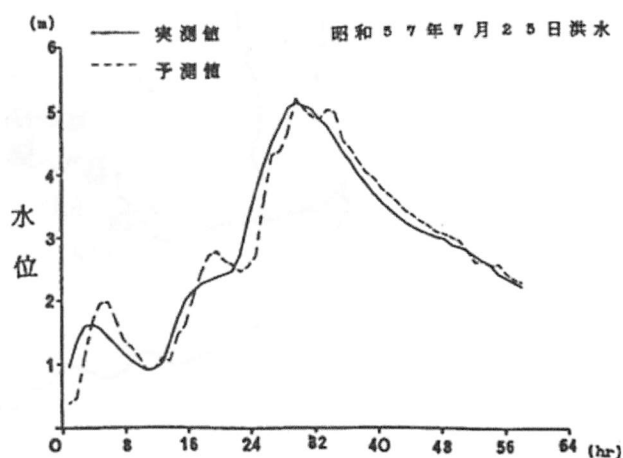


図8. 予測値と実測値の比較 (降雨無視, 5地点)

図-14 川内川における複数地点3時間予測の例 (左: 降雨予測あり、右: 降雨データ無し)²⁾

この結果から、リードタイムを到達時間以内にするにより、高精度の水位予測を行うことが可能であると考えられる。中小河川でも、これは同様と考えられる。

5. あめにわ憩いセンターにおける雨庭の検証

「あまみず社会」の概念の普及に向けた多面的で重層的な実践活動として、「あめにわ憩いセンター」の事例を紹介する。

「あめにわ憩いセンター」は築約50年の個人住宅を利用した拠点施設である。住宅の一部を開放し、雨水や緑を介した、地域の交流拠点として活用されている。本住宅には昔ながらの水使いなど様々な流出抑制手法を実装し、茶会やあめ庭塾、イベントなどが行われ、地域住民や来所者とのつながりが生まれている。



図-15 あめにわ憩いセンターの外観 甕にも雨水が貯留されている

5.1 雨水タンク等への水位センサーの設置⁶⁾

前述のように、3つの eTape 水位センサーが接続されたセンサーノードをあめにわ憩いセンターに設置した。2本のeTape は、図-16 のような小さなタンクを並列に接続した雨水タンクに設置した。図-17 にキャリブレーションの様子を示す。これらのセンサーをS1 とS3 とする。残りの1本のeTape 水位センサーは、雨庭の浸透能を計測するために、排水口に設置しこれを S2 とした。S1,S2,S3 の設置状況を、図-18 ～ 20 に示す。また、雨量はオフラインのオンセット社の HOB0-RG3 雨量計でオフラインに取り込んだものを使用した。



図-16 あめにわ憩いセンターの雨水タンクに設置したeTape

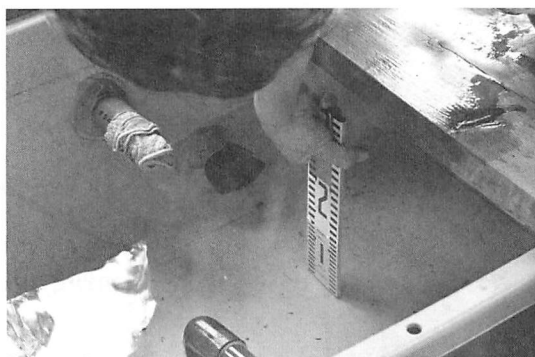


図-17 eTapeのキャリブレーションの様子

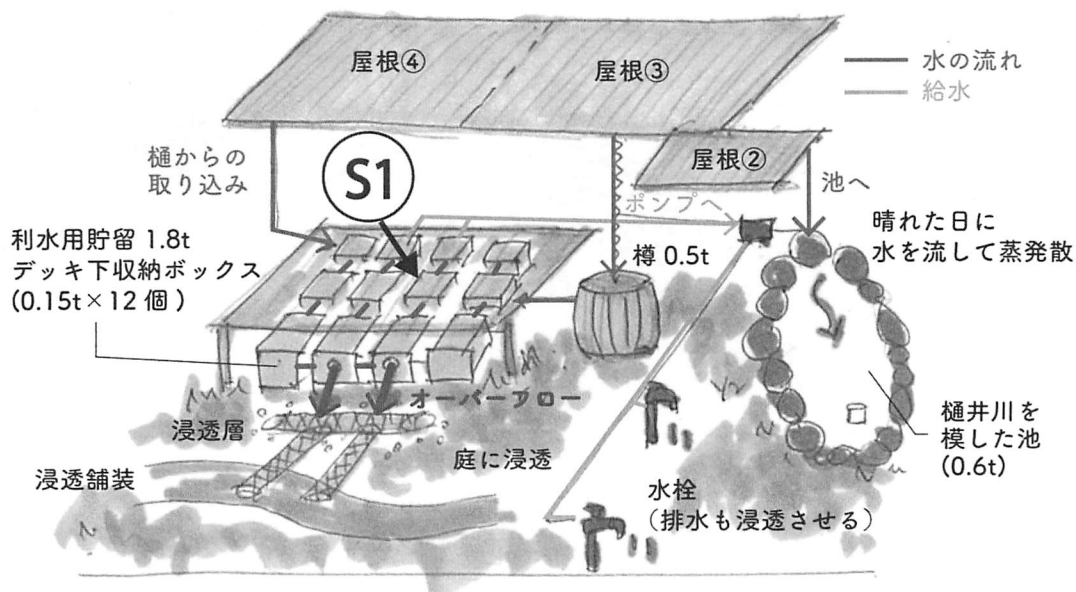


図-18 センサー S1 の位置

6th Oct. 2017 JST に観測された 1 時間雨量 19.6mm である⁷⁾。

表 -1 オンライン水位センサーに捕らえられた降雨イベント

開始時間	終了時間	最大 1 時間降雨量(mm)
09/17/2017 01:56:58	09/18 02:06:58	9
09/27/2017 03:01:58	09/28 10:46:58	3.6
10/02/2017 07:41:58	10/03/ 06:41:58	15
10/05/2017 20:46:58	10/06 14:26:58	19.6
10/14/2017 20:51:58	10/19 05:06:58	5.2
10/28/2017 07:51:58	10/29 13:06:58	4.2
11/07/2017 20:06:58	11/08 07:41:58	2.4

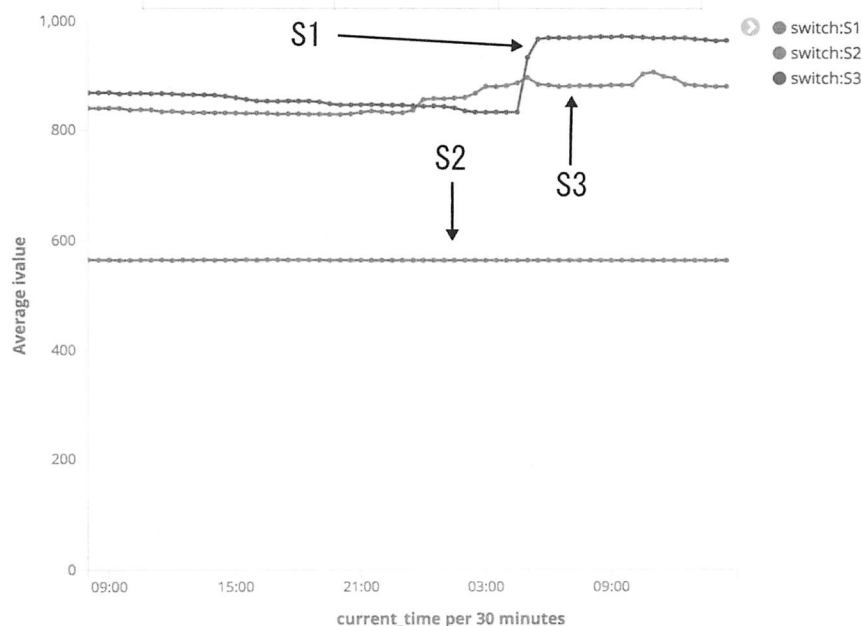


図 -21 最大 1 時間降雨量 19.6mm 降雨イベント時の Kibana による水位センサーの変動

6. グリーンインフラを用いた防災都市のシミュレーション

あまみず社会研究会と密接な関係を保っている、「善福寺川を里川にカエル会」との連携の中で、合流式下水道の雨天時越流水 (Combined Sewer Overflow:CSO) により悪化した善福寺川の水質を改善するだけでなく、GI を導入して洪水抑制のシミュレーションの例⁸⁾を紹介する。

6.1 シミュレーション条件

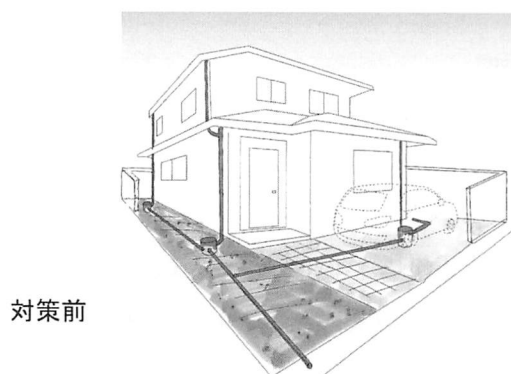
対象は善福寺川上流域の CSO 越水口の集水域とし、表 -2 に示すようなグリーンインフラ導入モデルを適用した。ここで注意が必要なのは、前庭の最終浸透能が 100mm/hour という点である。この地域は関東ローム層であるため、東京都は最終浸透能を 140mm/hour としているが⁹⁾、屋根からの流出も受け止めなければならないため、75mm/hour として計算している。

この下水道の集水域は戸建て住宅が多く、屋根と前庭の面積は集水域の 66.3% を占めている。まず屋根から出てくるあまみずの 50% 相当の樋と桝の連結を切り、25% 分は前庭へ導水して土壌に浸透させ、25% 分は雨水浸透ますへ流入させている (図 -21)。これにより雨水管に直接流出する雨は 50% になった。人工被覆が大部分を占める駐車場スペースを含む前庭は、緑地面を大幅に増やし、地表面や建物屋根から流入した雨水を浸透させる「雨庭 (浸透型植栽空間)」にしている。さらに 2 車線以上の広

幅員道路では、歩道に透水性舗装を導入し、緑地帯をバイオスウェール（線状の浸透型植栽柵）に変更することにより全道路面積に対して初期損失 32mm、浸透 20mm/hr 確保している。住宅街の中の 1 車線道路においては、通過交通を抑制するためにコミュニティ道路化し、余白部分にはバイオスウェールを設け、表面流出水を浸透させることにより道路面積に対して初期損失 60mm と浸透 22.5 mmを確保している（図 -22）。駐車場や学校のグラウンド等も緑化、または透水性の表面材料を用いることで、浸透させ流出ゼロとしている。対象降雨を関東地方の可能最大降雨程度の豪雨であった、2017 年 7 月に発生した九州北部豪雨の降雨イベントとしている。この豪雨は福岡県朝倉観測所において解析雨量で 3 時間 400mm、24 時間 1000mm、観測された 60 分最大雨量 169mm/h という非常に大きな豪雨である。

表 -2 グリーンインフラ導入モデル ⁸⁾

土地利用	グリーンインフラ導入モデル
建物	樋の本数のうち、25%を前庭に、25%を浸透トレンチに浸透させ、合わせて 50%の流出抑制
前庭	緑地面を増やす (浸透能力 100mm/h、計算上は 75mm/h)
道路 (2 車線以上)	歩道の浸透化 (初期損失 32mm、浸透 20mm/hr)
道路 (1 車線)	コミュニティ道路化、バイオスウェール整備 (初期損失 60mm と浸透 22.5mm)
学校	グラウンドの人工芝化・トースド工法により流出ゼロ
公園	浸透化、地下に防災用雨水貯留施設により流出ゼロ
上記以外の非浸透域	浸透化により流出ゼロ



対策前



対策後

- 建物・・・全部流出 (樋と雨水桝直結)
- 前庭・・・5mm/hr浸透 (通路や駐車場)

敷地に降った雨→99%流出

- 建物・・・流出50%削減 (樋50%切る、25%は前庭へ、25%は浸透トレンチへ)
- 前庭・・・100mm/hr浸透 (緑を増やす)

敷地に降った雨→約60%カット

図 -22 戸建住宅における GI 導入モデル ⁸⁾

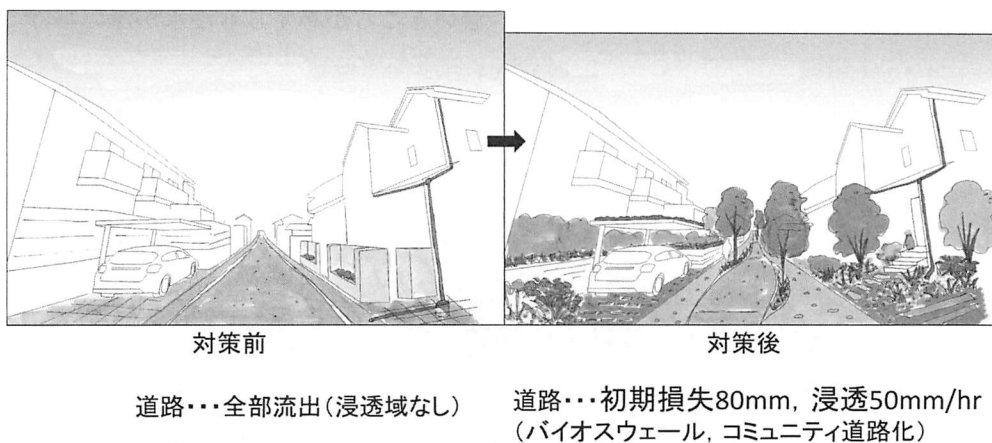


図-23 グリーンインフラ導入モデル (1 車線道路)⁸⁾

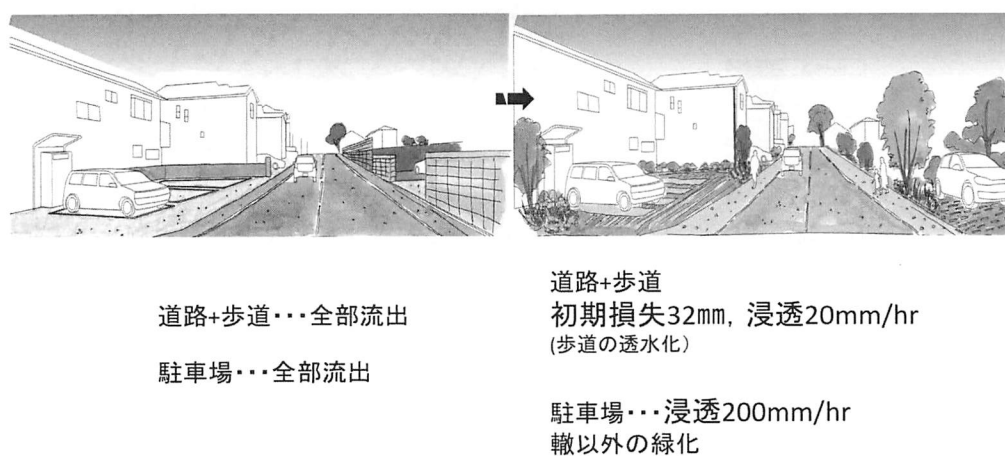


図-24 グリーンインフラ導入モデル (2 車線以上の道路 + 駐車場)⁸⁾

6.2 シミュレーション結果

このような甚大な豪雨に対しても GI 導入による洪水抑制効果は大きく、現状に対し GI 導入後は洪水流出総量は 98% 抑制され、最大浸水深は 80cm 以上あった場所も 20cm 未満まで削減されている (図-25, 図-26, 図-27)。



図 -25 無対策の場合の浸水シミュレーション⁸⁾

カラー表示をそのまま白黒にしているので、濃いところが必ずしも浸水が深いわけではない

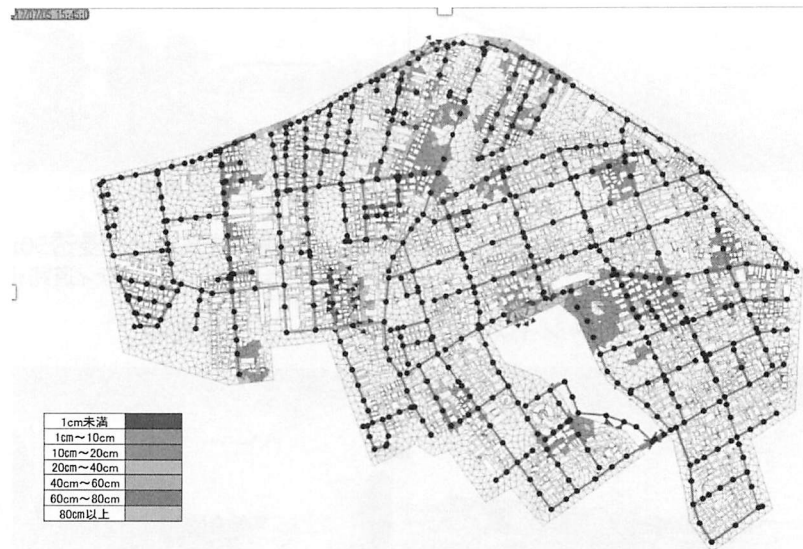


図 -26 対策後の場合の浸水シミュレーション (図 25 と時刻は同じ)⁸⁾

カラー表示をそのまま白黒にしているので、濃いところが必ずしも浸水が深いわけではない

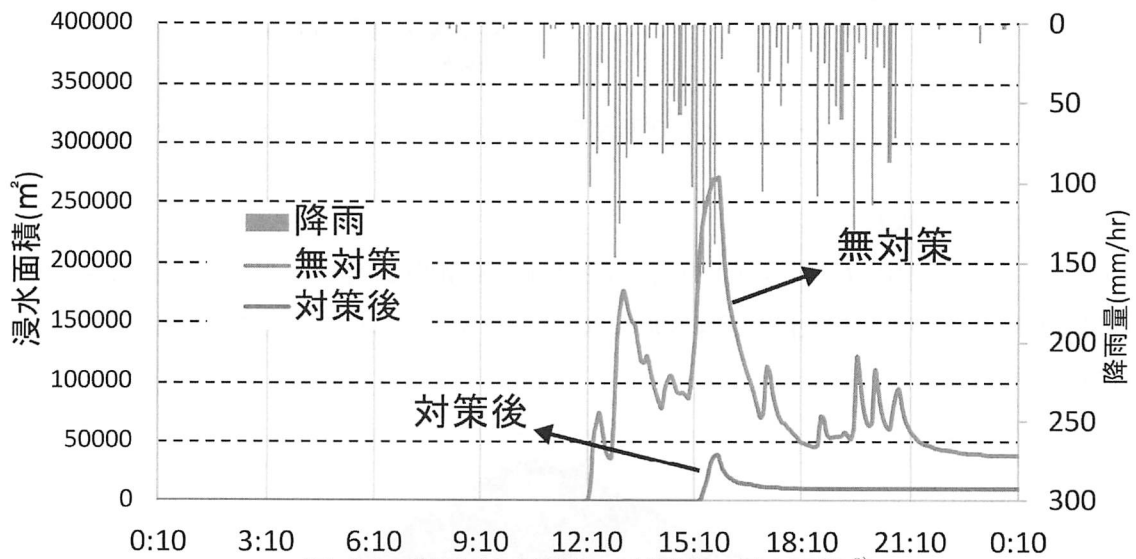


図 -27 降雨量と対策前、対策後の浸水面積⁸⁾

1 年間の降雨を対象に、CSO の発生回数、発生ボリュームの変化を計算している（図 -28）。CSO 発生回数は年 24 回発生していたものが、GI 導入により年 4 回にまで抑えられ、流出総量は 94%減少することが明らかとなり、GI 導入により善福寺川の水質は大幅に改善されている。さらに、各個で雨水を貯留し、庭の散水や掃除等に利用することで、上水の使用量も抑制され、渇水のリスクも軽減される。また、地震時には上水の供給がストップするリスクが高いが、雨水貯留は防災時に自立的な水源として効果的であると報告されている⁸⁾。

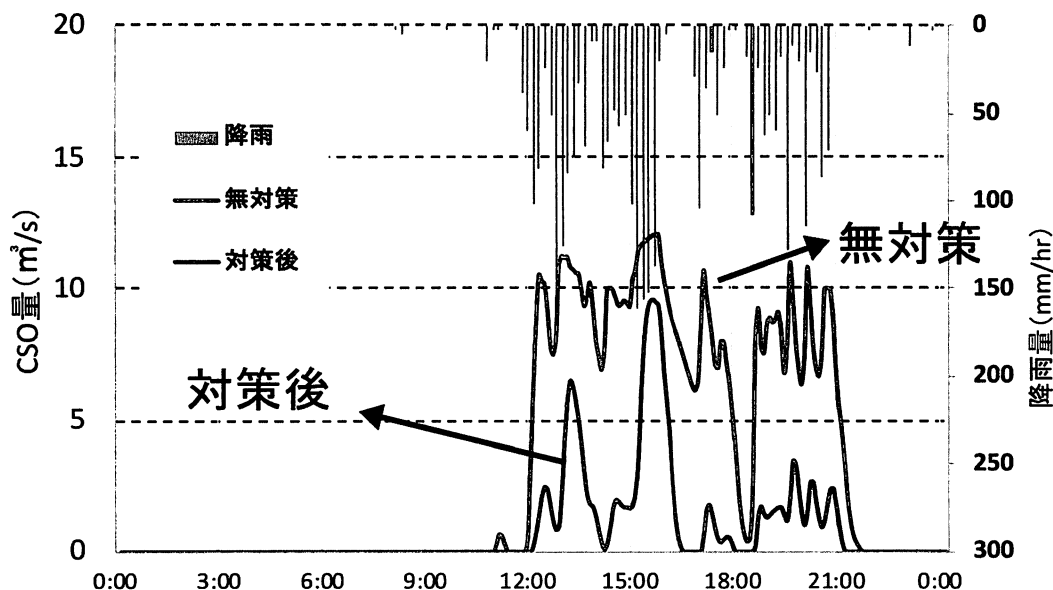


図 -28 CSO と対策前、対策後の浸水面積⁸⁾

7. おわりに

あまみず社会を実現するための取り組み（社会実装）として、IoT-DRR と GI を紹介した。どれも道半ばではあるが、今後は市民の水意識を向上させながら防災に取り組む必要があり、その第 1 歩と考えている。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の社会技術研究開発センター（RISTEX）により採択された戦略的創造研究推進事業の支援によって行われた。

参考文献

- 1) Real-Time Forecasting for Stages of Flash Flood, M.Hirano, T.Moriyama, M.Masaki, H.Nakayama, K. Matsuo, 5th Congress of IAHR-APD, 1986, Vol.IV, pp269-282
- 2) 洪水位の短時間予測に関する研究、平野宗夫・森山聡之・山下三平・中山比佐雄、第 31 回土木学会水工学講演会論文集、1987,pp137-142
- 3) Real-Time Forecasting for Stages of Flash Flood(Part2), M.Hirano,T.Moriyama, S.Yamashita, H.Tetsuya, 6th Congress of IAHR-APD, 1988, Vol.II-22
- 4) レーダ雨量計を用いた洪水位の短時間予測、森山聡之・平野宗夫・中山比佐雄・松尾景治・鐵谷浩之、第 33 回土木学会水工学講演会論文集、1989,pp85-92

- 5) 降雨による河川氾濫予測情報を導出する端末及びプログラム」, 森山聡之・平野宗夫・中山比佐雄、特許 4323565,2009
- 6) 雨水管理のためのセンサー技術と IoT-DRR, 森山聡之 森下功啓 和泉信生 西山浩司、水循環 特集 / 雨水管理の最先端技術（その4 施設）,2017
- 7) Development of Distributed Multi-purpose Dam by residents with IoT Network, Toshiyuki Moriyama, Fumiko TAURA, Katsuhiko Morishita, Jun Teramura, Shinobu Izumi, proc. of DCT-DM 2018,2018, 投稿中
- 8) 分散型の水管理を通じたあまみず社会のデザインと実践、田浦 扶充子、島谷 幸宏、小河原 洋平、山下 三平、福永真弓、渡辺 亮一、皆川 朋子、吉富 友恭、伊豫岡 宏樹、浜田 晃規、竹林 知樹、第 57 回土木計画学研究発表会（春大会）論文集、2018