都市浸水の予測とリスク管理に関する成果紹介

1）社会連携講座と未来社会創造事業について
2）水位等のリアルタイムセンシング
3）浸水解析におけるデータ同化技術
4）将来の研究展開

東京大学大学院工学系研究科
附属水環境制御研究センター・教授
古米 弘明

東京大学大学院工学系研究科社会連携講座

未来型の都市浸水リスク管理・制御システム

Futuristic System for Urban Flood Risk Management and Control

設置専攻：都市工学専攻

設置期間：2019年4月1日-2022年3月31日（3年間）

研究及び教育目的：都市における集中豪雨による内水氾濫に備えるため、浸水を高精度にモデル予測するとともに、観測と予測データを統合的に解析して未来型の都市浸水リスクの管理と制御のためのシステムを創出する。また、ICTを活用した都市雨水管理などの成果を教育に生かし、この分野において国際的に活躍できる若手人材を育成する。

東京大学社会連携講座
未来型の都市浸水リスク管理・制御システム

http://www.scpmirai.t.u-tokyo.ac.jp/

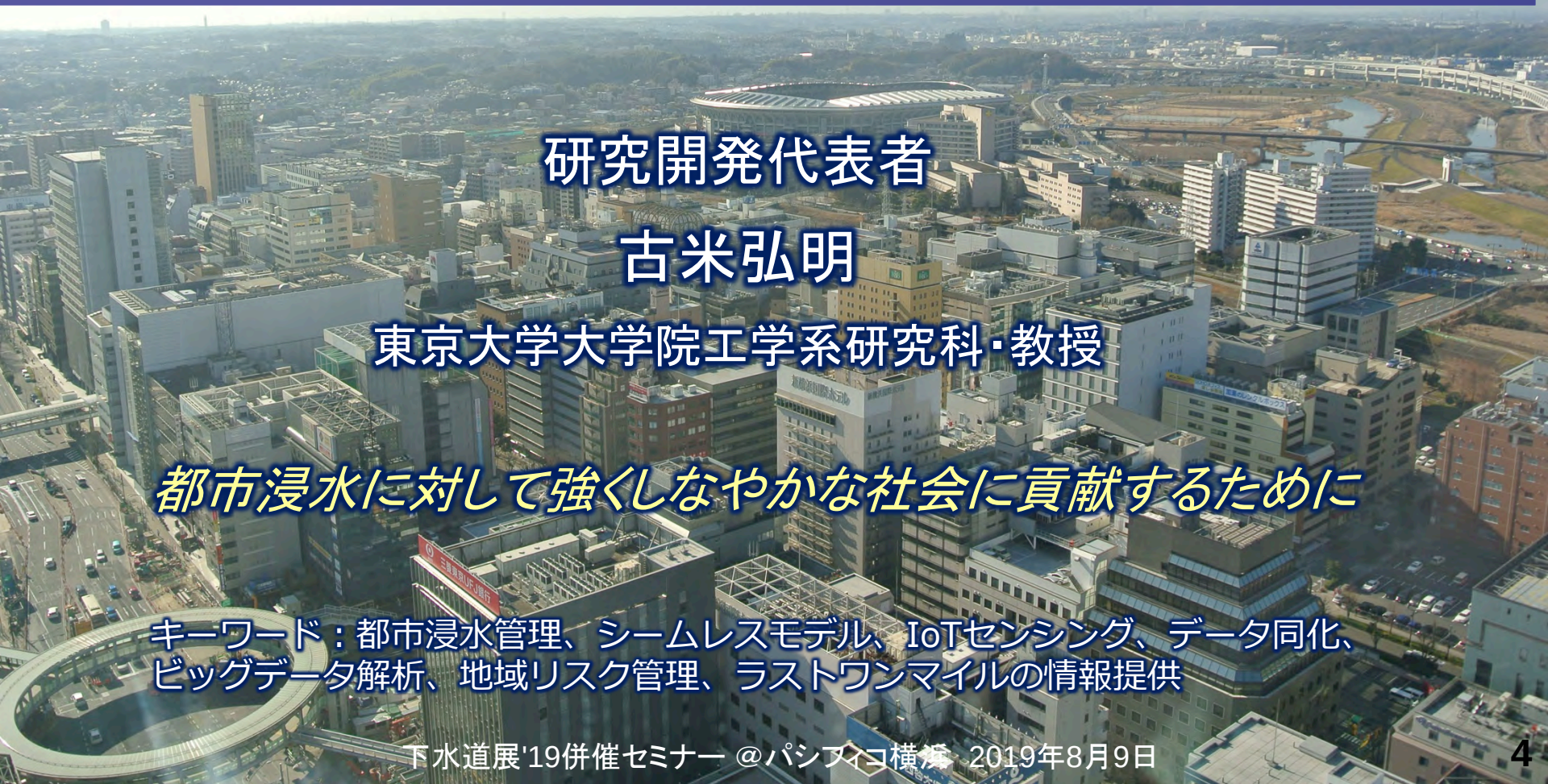
明電舎 MEIDEN
メタウォーター株式会社 METAWATER
HITACHI Inspire the Next
東芝インフラシステムズ株式会社
MITSUBISHI ELECTRIC
TEC グループ 株式会社東京設計事務所 TEC
株式会社日水コン
NJS
日本水工設計
いであ株式会社
FUSO
水ing Swing Corporation

平成29年度「探索加速型」研究開発
応募重点公募テーマ「ひとりひとりに届く危機対応ナビゲーターの構築」

研究期間：2017年11月 - 2020年3月

研究開発課題名

都市浸水リスクのリアルタイム予測・管理制御



研究開発代表者

古米弘明

東京大学大学院工学系研究科・教授

都市浸水に対して強くしなやかな社会に貢献するために

キーワード：都市浸水管理、シームレスモデル、IoTセンシング、データ同化、
ビッグデータ解析、地域リスク管理、ラストワンマイルの情報提供

研究背景

- 気候変動に伴う豪雨の頻発を想定した都市浸水から安全で安心な災害レジリエンスの高い社会の構築に向けて

都市浸水から安全で安心な災害レジリエンスの高い社会を構築することは、SDG目標11や目標13に関わるものである。特に、大都市では、地下鉄や地下街など浸水に極めて脆弱な空間が存在している。また、局地的な大雨の発生頻度の増加に伴い浸水対策の困難さが増している一方で、財政制約から施設整備の拡充には限界がある。

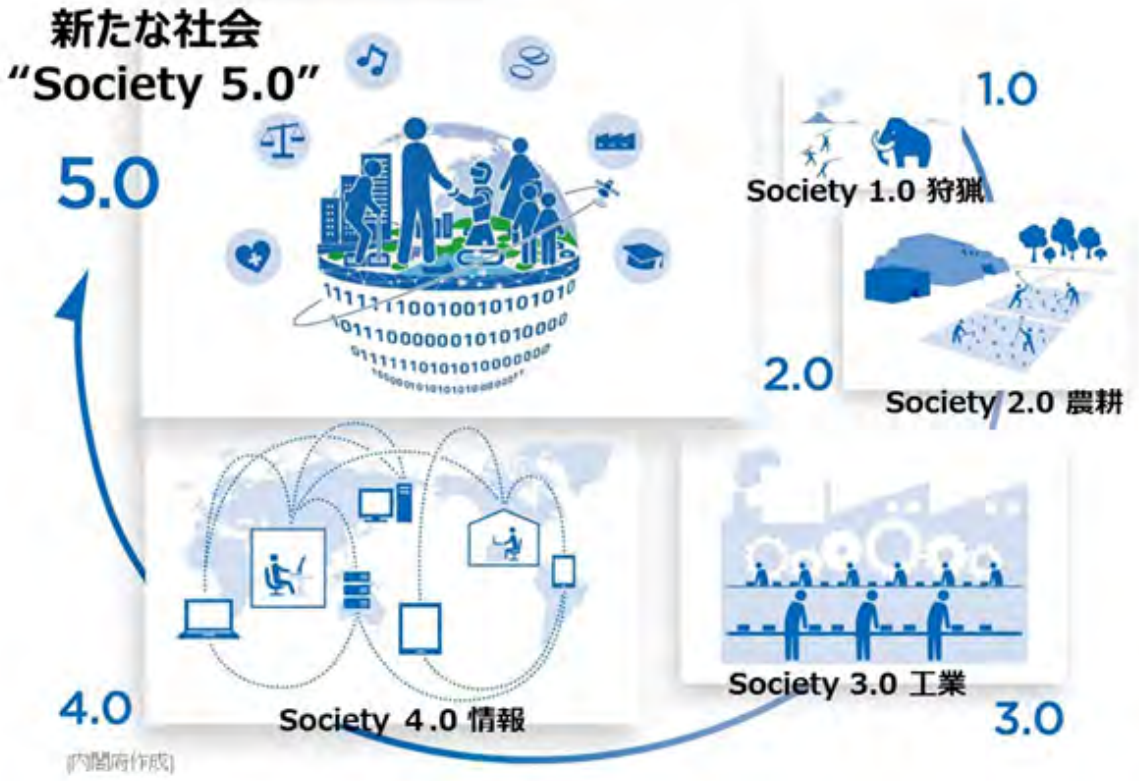
2014年6月25日　浸水深 2.2m
和光市アンダーパス道路

- 観測データを用いた都市浸水モデルの検定・検証の必要性

気象や河川の防災部局に比較すると、下水道部局における観測やモデル予測の技術は遅れている。水位観測や浸水モデルの検定が十分ではなく、現場への本格的な実装には至っていない。したがって、下水管内水位や内水氾濫水位の観測データを取得して都市流出及び浸水現象の再現性向上のための都市浸水モデルの検定や検証を行う必要性がある。

Society 5.0とは

第5期科学技術基本計画において提唱された、我が国が目指すべき未来社会の姿であり、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会（Society）



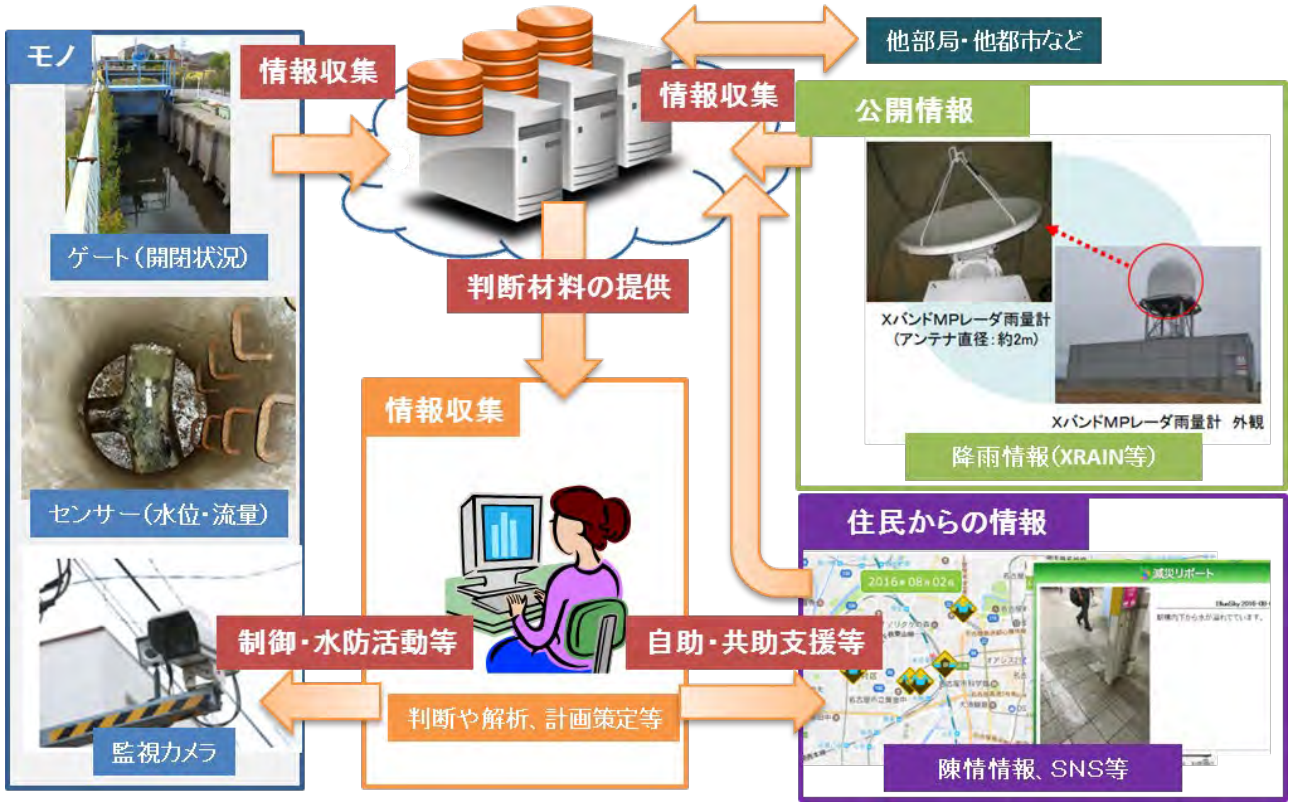
- IoTで全ての人とモノがつながり、様々な知識や情報が共有され、今までにない新たな価値を生み出す。
- 人工知能（AI）の活用により、少子高齢化、地方の過疎化、貧富の格差などの課題を克服する。
- 社会の変革（イノベーション）を通じて、希望の持てる社会、世代を超えて互いに尊重し合あえる社会、一人一人が快適で活躍できる社会にする。

https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html

i-Gesuido（雨水管理スマート化2.0）

◯ ICTを活用した下水道事業の効率性の向上や情報の見える化等を推進する取組み
◯ 浸水対策に関する取組として、雨水管理スマート化2.0を柱の一つとして掲げ、ICTを活用した浸水リスク情報の見える化・リアルタイム発信、ポンプ場等の最適運転の自動化を通じた雨水管理の効率性向上や、水位情報等のビッグデータ活用による新たな産業等の創出の取組み

ICT活用のイメージ



浸水対策における ICT活用による効果

①気象災害の局地化・激甚化

→浸水状況の把握、今後の状況の予測による迅速な対応、自助・共助のリードタイム確保

②都市化進展による被害増加

→雨水管理の最適化による効率的な浸水対策

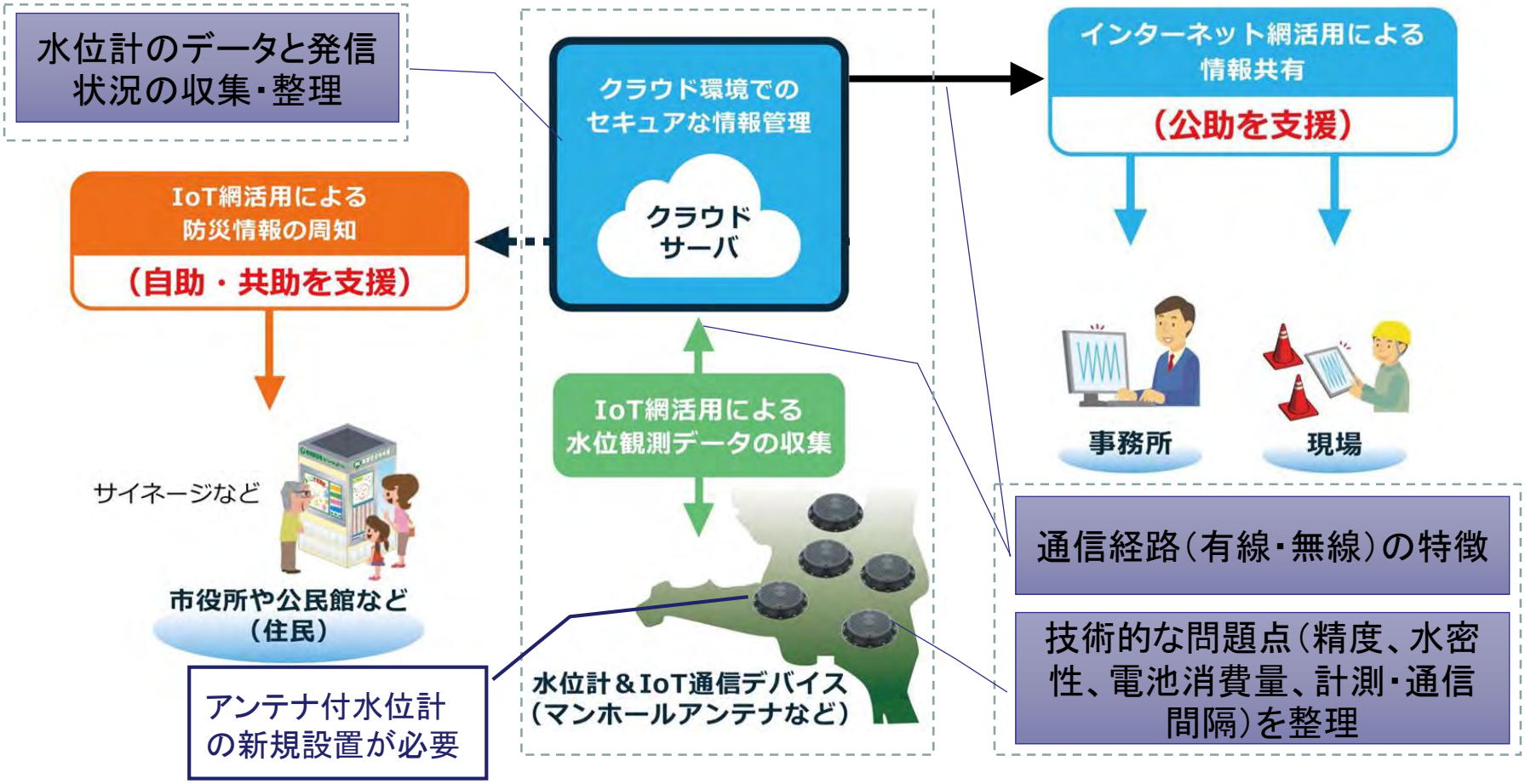
③下水道職員の減少等

→水防活動の効率化

水位周知下水道

下水管内水位情報等の発信の試行の支援

- ○ 水位情報の発信や水位データの収集・整理により、適切な発信先、発信方法、頻度等を整理
- ○ 水位情報を伝搬する通信経路（有線・無線）の特徴、水位計を常設し運用する際の技術的な問題点（精度、水密性、電池消費量、計測・通信間隔）を整理



未来社会創造事業研究で達成するPOC

Proof of Concept:「概念実証」

データ同化とシームレスモデルを統合活用した リアルタイム都市浸水リスクの予測・管理制御技術

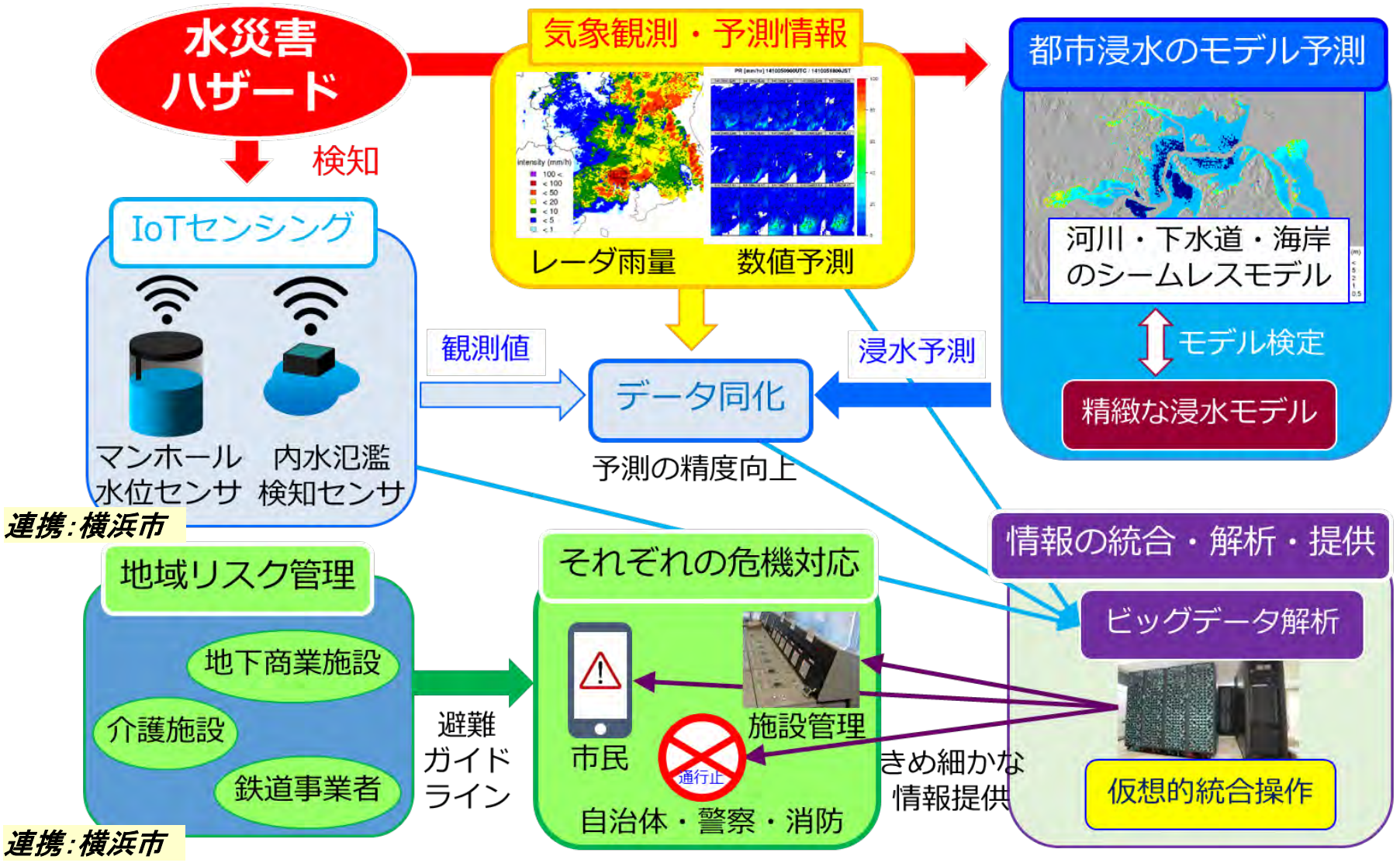
- **新たな浸水・氾濫予測モデルを構築**:集中豪雨よる浸水や氾濫に備えるために、実際の観測値を入力して現実に近い予測を行うデータ同化手法をモデルに導入し、***気象観測・予測データを用いた浸水予測精度を向上***させる。
- **河川と下水道の一体的な管理制御システムの構築**:河川と下水道の一体的な管理に基づいて、集中豪雨による浸水・氾濫を防止ためにポンプ施設などの***都市排水施設を最大限に活用できる高度な制御方策を提案***する。
- **地域社会への浸水リスク情報提供**:浸水被害軽減のための***避難行動誘導や浸水防止計画の立案手法を提案***する。

ICT技術を駆使した
都市浸水から安全で安心な災害レジリエンスの高い社会の構築

- *浸水・氾濫予測情報に基づく河川と下水道の一体的な管理制御システムの構築*

- *防災の観点から被害軽減のための避難行動の誘導システムや浸水防止計画の立案手法の構築*

研究構想図


水災害
ハザード
検知
気象観測・予測情報
レーダ雨量
数値予測
都市浸水のモデル予測
河川・下水道・海岸
のシームレスモデル
モデル検定
精緻な浸水モデル
IoTセンシング
マンホール
水位センサ
内水氾濫
検知センサ
観測値
浸水予測
データ同化
予測の精度向上
連携：横浜市
地域リスク管理
地下商業施設
介護施設
鉄道事業者
連携：横浜市
避難
ガイド
ライン
それぞれの危機対応
市民
施設管理
通行止
自治体・警察・消防
きめ細かな
情報提供
情報の統合・解析・提供
ビッグデータ解析
仮想的統合操作

ひとりひとりに届く危機対応ナビゲーターの構築

都市浸水リスクのリアルタイム予測・管理制御

研究開発代表者： 古米 弘明　東京大学 大学院工学系研究科 教授

共同研究機関： 東京大学、早稲田大学、土木研究所

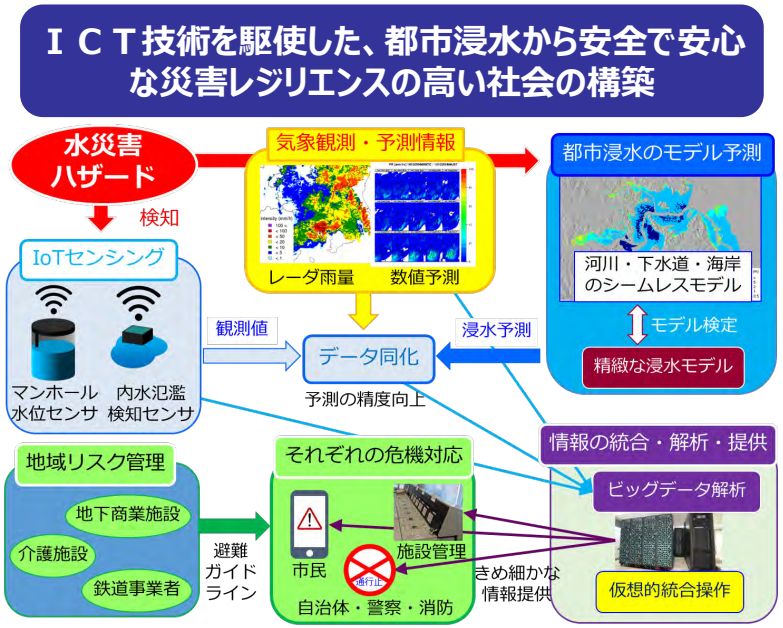
目的：

https://www.jst.go.jp/mirai/jp/uploads/saitaku2017/JPMJMI17D5_furumai.pdf

マンホール水位センサやレーダ雨量等の情報を、数値モデルの精度を高めるデータ同化手法に適用して浸水を予測するとともに、これらのビッグデータを統合的に解析して都市浸水の危機管理情報を創出する。

研究概要：

都市において集中豪雨よる浸水や氾濫に備えるためには、流出雨水を受け入れる河川と下水道を一体的に管理して、効率的かつ効果的に排水しなければならない。しかし、現在は河川と下水道の流出特性をシームレスに高速予測できるモデルが存在せず、一体的な管理制御は困難である。そこで、本研究はモデルに実際の観測値を入力してより現実に近い予測を行う手法（データ同化手法）を導入し、気象観測・予測データ、河川の水位、下水管路内水位を統合的に解析する新たな浸水・氾濫予測モデルを構築する。それにより、河川と下水道の一体的な管理に基づく、都市排水施設の高度な制御が実現し、河川にポンプ排水すべきか、下水道へ貯留が可能かなど施設を最大限活用する方策の判断をより適切に行うことができる。集中豪雨による浸水・氾濫を防止するのみならず、被害軽減のための避難行動誘導や浸水防止計画立案にも貢献する。



http://www.recwet.t.u-tokyo.ac.jp/mirai/index.html

主な研究計画・項目

古米紹介

1） 管路水位等のリアルタイムセンシング技術の開発

a) 下水管内水位のリアルタイムセンシングの実施

b) 排水溝の設置を想定した浸水検知センサの開発

2） リアルタイム観測情報を活用したデータ同化手法の開発

c) 水位データを活用するシームレスモデルへのデータ同化機能の組み込み

3） 降雨・浸水予測に関するビックデータの処理・解析システムの開発

d) 高解像度降水ナウキャストなどの予測値とレーダ観測雨量との誤差評価

e) 河川水位、XRAINレーダ雨量、数値気象予測値などとともに、水位センサ情報のリアルタイムデータアーカイブ化

渋尾紹介

4） 都市浸水、河川洪水、沿岸の一体的なハザード予測手法の精度検証

f) データ同化導入のシームレスモデルによるハザード予測を実施

g) 地表面や下水道管路網などを現実に即した精緻な浸水解析の実施

5） 自治体・地域社会の浸水リスク管理手法の考案

h) 自治体・当事者と避難行動の共創を図るためのタイムラインと行動ルール案の作成、地域におけるワークショップの開催

i) 流域内のポンプ施設の効率運転をモデル操作できるようなモデル化情報整理

下水管内水位のリアルタイムセンシング

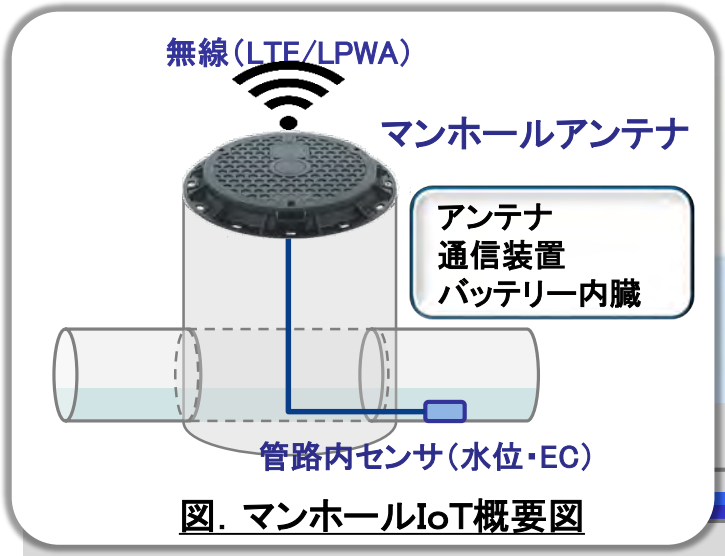
管路情報、土地利用情報、観測データ・降雨情報の統合集約，DIASサーバーとの連携

降雨観測値と予測値を用いたシームレスモデルによる管内水位や浸水の予測計算結果

・観測データ／降雨情報など統合集約するクラウドサーバ管理システムを検討

観測データ収集

下水管内水位観測データのリアルタイム収集（マンホールIoT）



図．マンホールIoT概要図

・観測データは浸水モデルのデータ同化に適用

・マンホールIoTによる下水管内水位リアルタイムセンシングを導入
・LTE/LPWA組合せの無線ネットワークで観測システムを構築

マンホールアンテナ概要

通信アンテナ、通信装置、バッテリーをマンホール蓋に内蔵

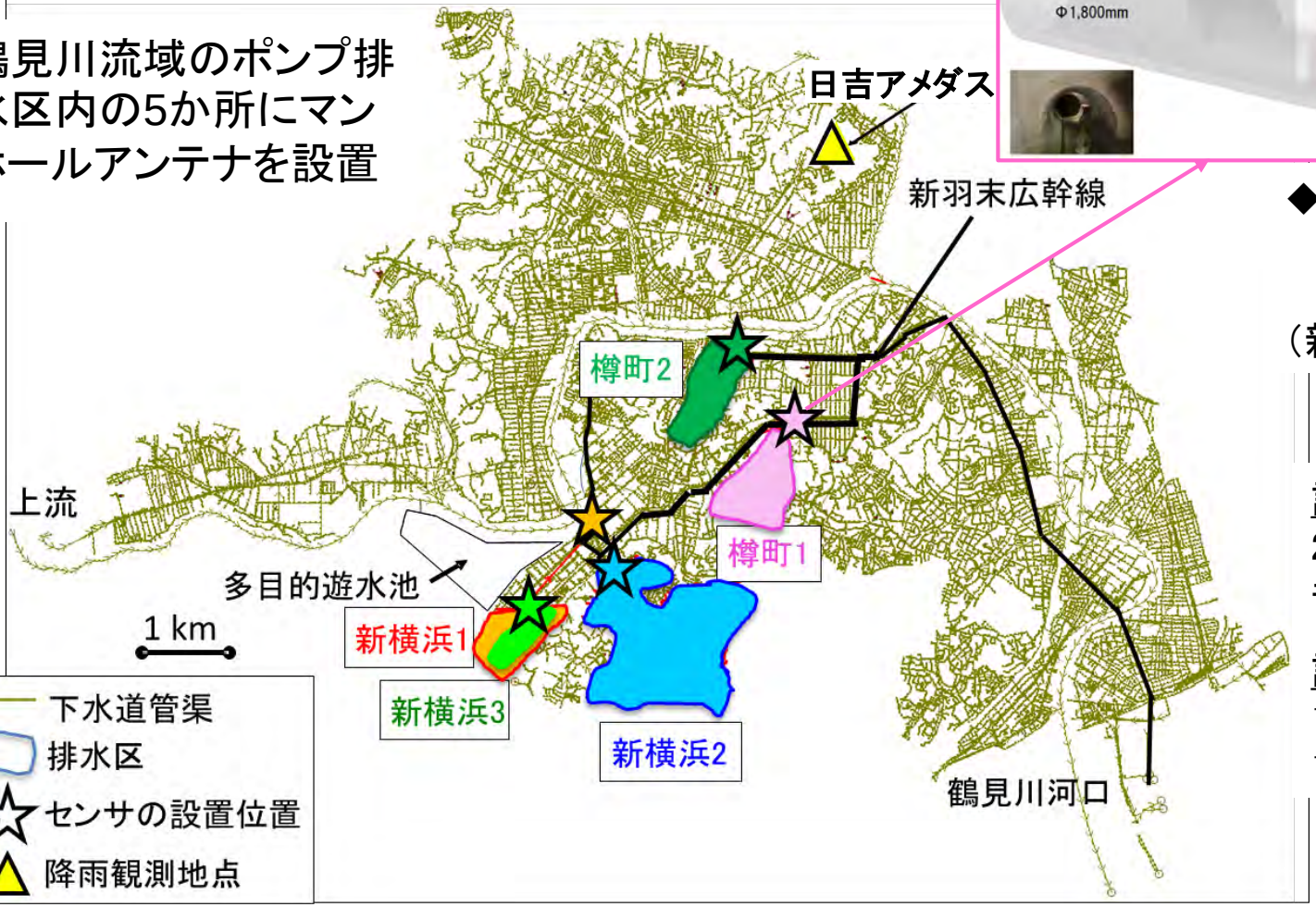
※ マンホールアンテナは、東京都下水道サービス㈱、日之出水道機器㈱および㈱明電舎の共同開発品。

項目	仕様
準拠規格	日本下水道協会規格JSWAS 下水道用鋳鉄製マンホールふた （呼び300～900）JSWAS G-4-2009
種類	**標準型φ600**
耐荷重	**T-25**

水位センサの設置位置

項　目	小排水区				
	新横浜1	新横浜2	新横浜3	樽町1	樽町2
面積　[ha]	20	188	13	57	42
ノード　[数]	232	3235	145	474	581

鶴見川流域のポンプ排水区内の5か所にマンホールアンテナを設置

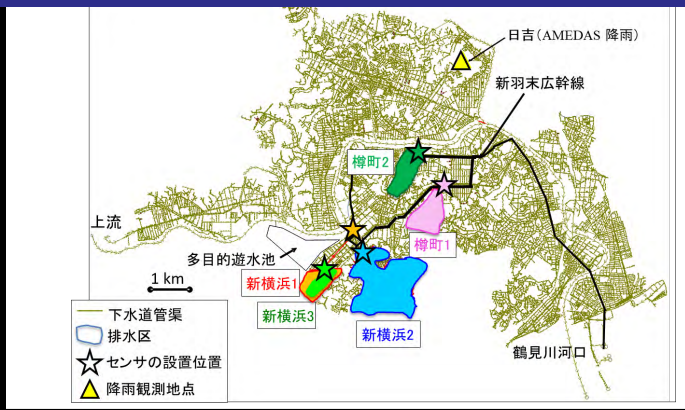


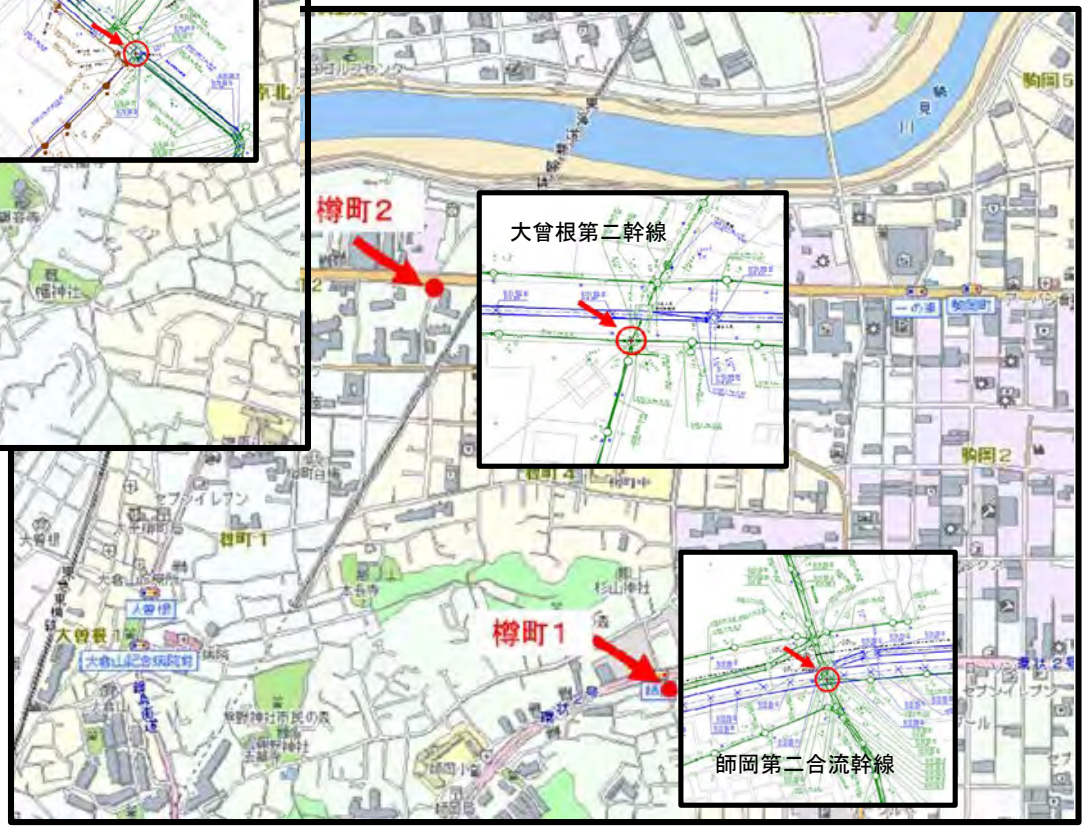
◆ 水位センサ設置：
地下4.2m
樽町１合流幹線
（新羽末広幹線に接続）

計測開始
2018年6月末から現在も継続中

計測間隔と通信方式
1分間隔で計測
10分毎にLTE網で通信

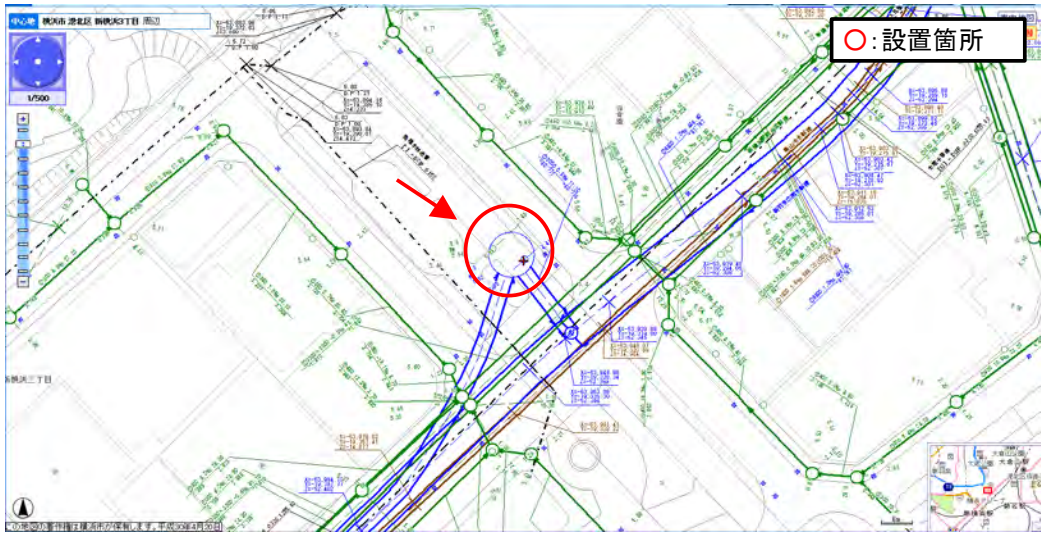
水位センサを設置した管渠

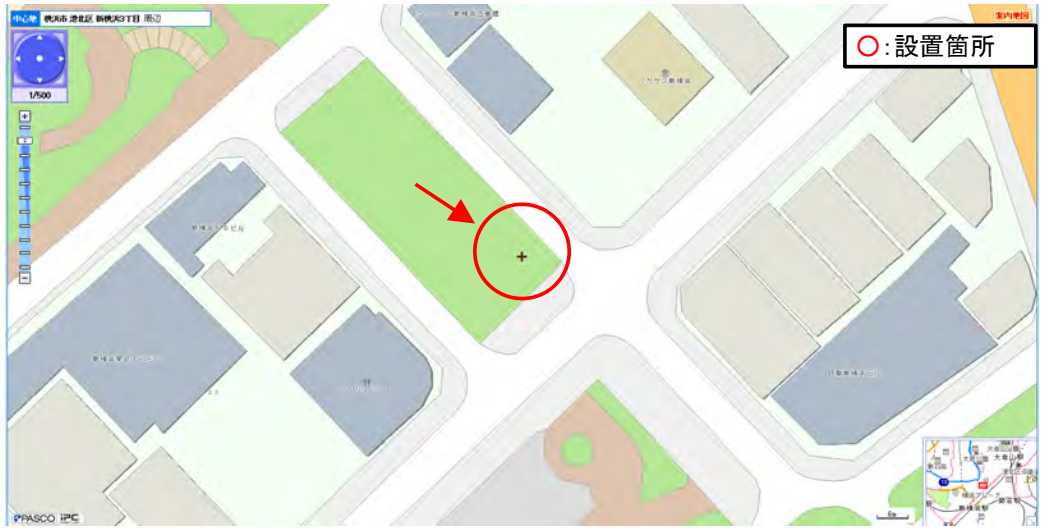


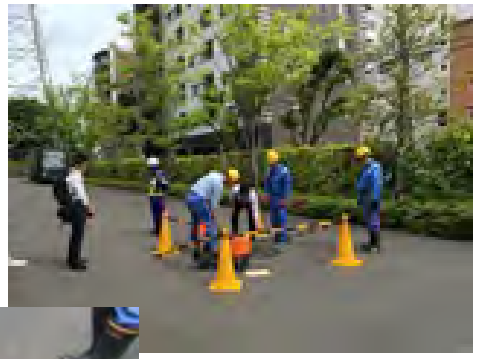


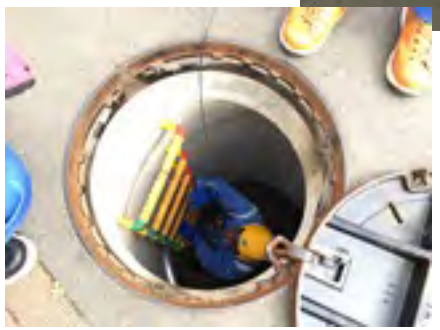
設置場所の台帳図、現場状況

新横浜1：横浜市港北区新横浜3丁目24−2付近





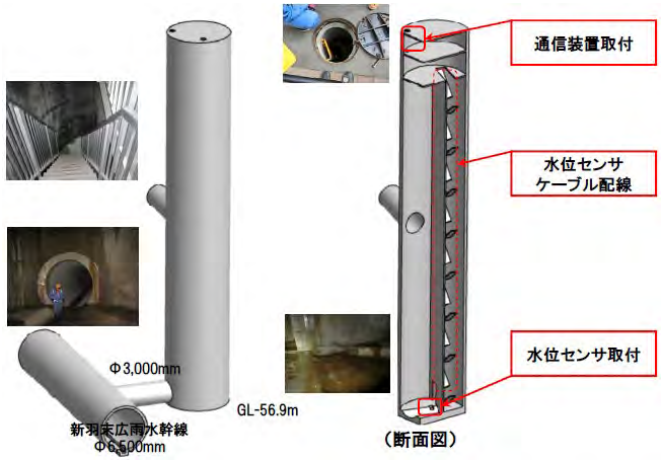




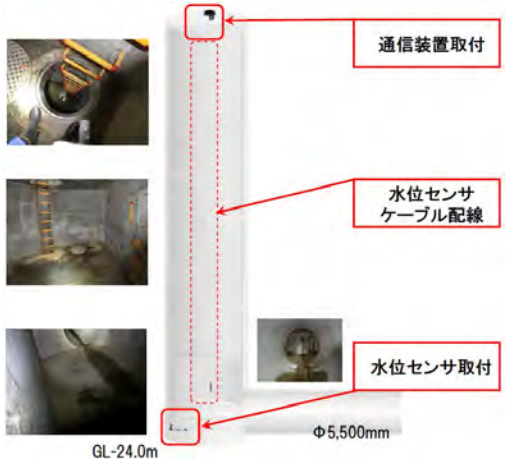
遠隔のリアルタイム水位観測システムの導入

横浜市港北区内の排水区内において、下水幹線の5ヶ所に人孔内および人孔蓋裏に水位計、無線通信用アンテナ、バッテリー等からなる観測機器を設置し、リアルタイムにクラウドにデータ収集・蓄積を行う遠隔水位観測システムを導入した。

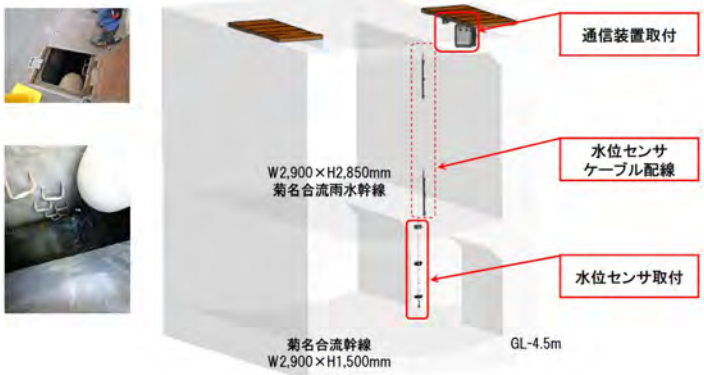
新横浜1：地下56.9mの雨水幹線



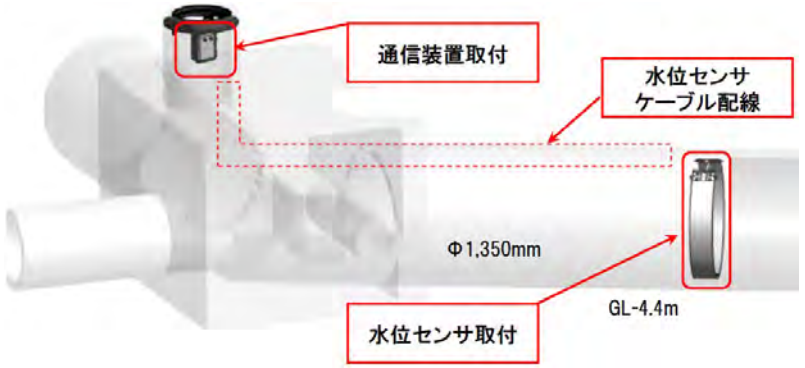
新横浜3：地下24mの雨水幹線



新横浜2：地下4.5mの菊名合流幹線



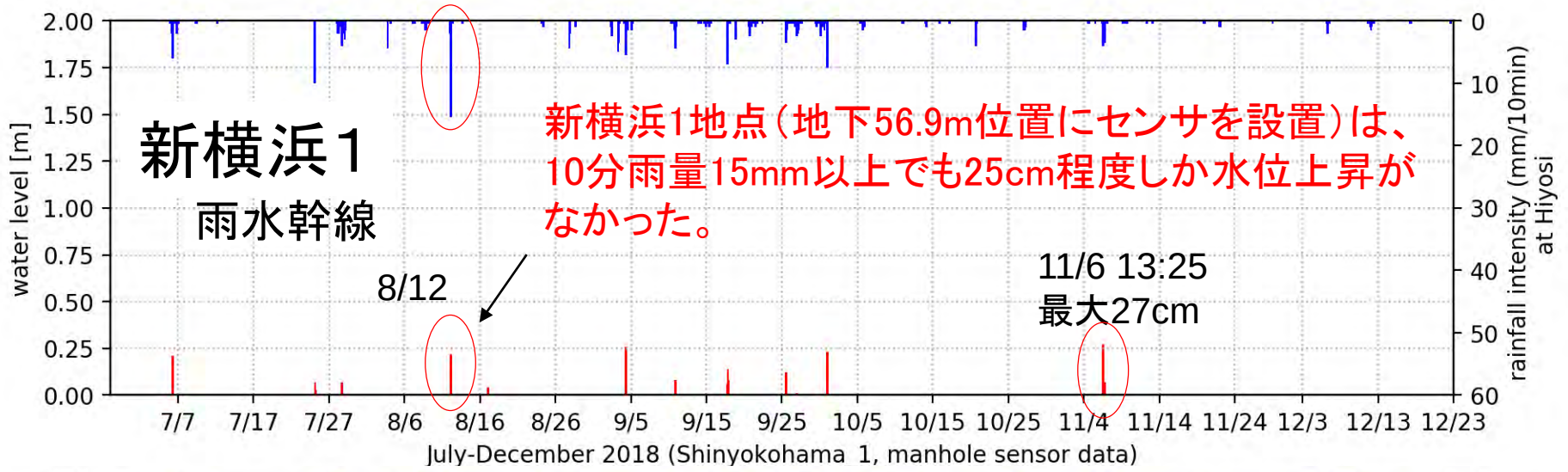
樽町2：地下4.4mの樽町2合流幹線

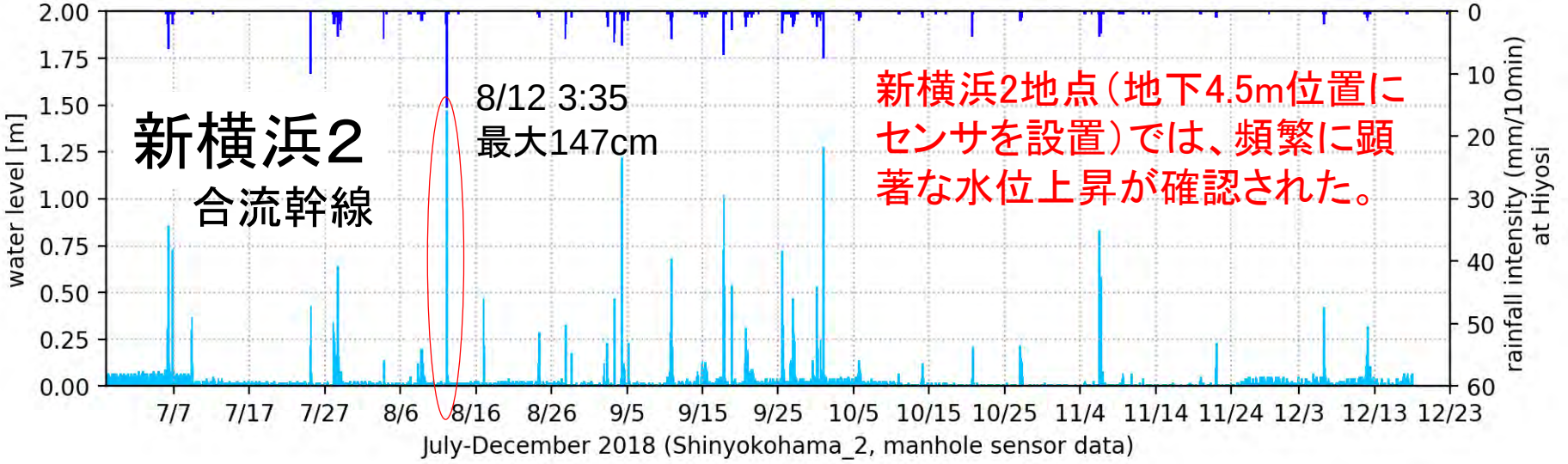


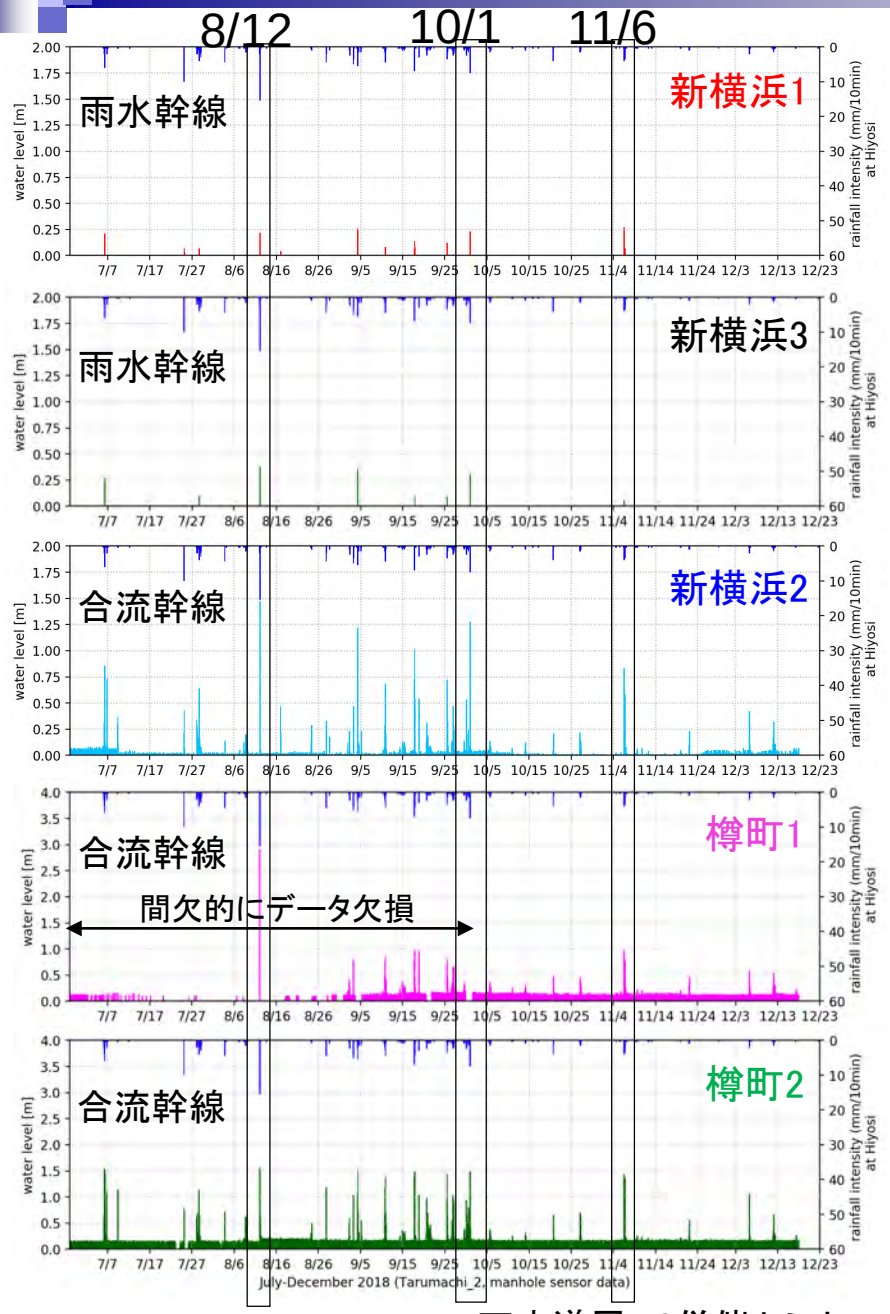
クラウド保存の管内水位の観測結果表示例

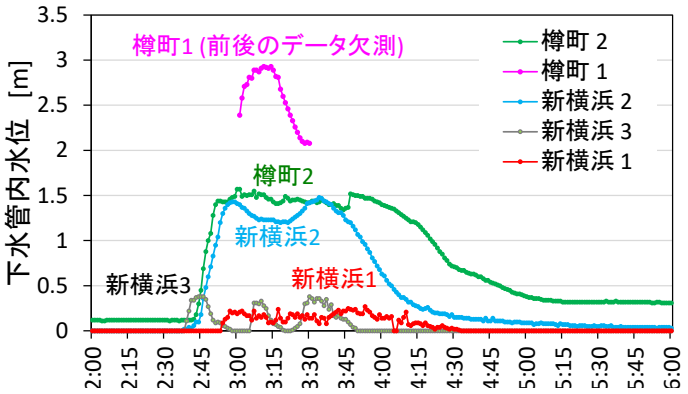
2018年8月12日　降雨イベント時

観測結果の比較：雨水幹線と合流幹線

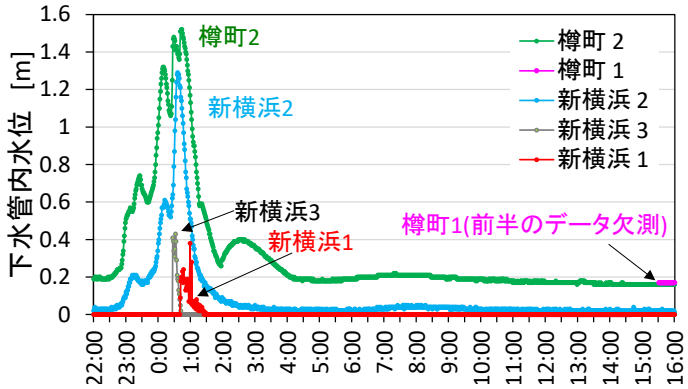




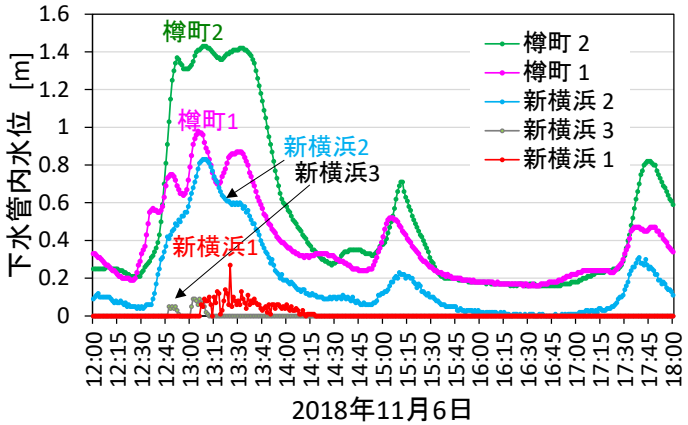




8月12日



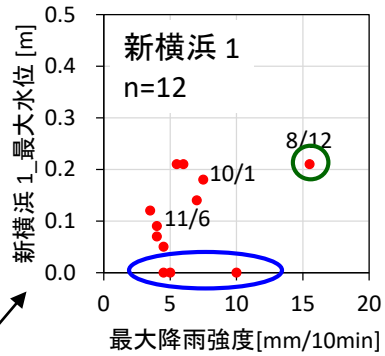
10月1日



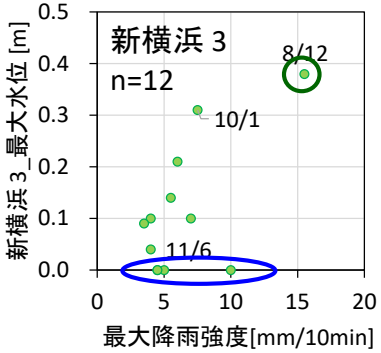
11月6日

新横浜2と樽町1・樽町2は類似の水位上昇傾向

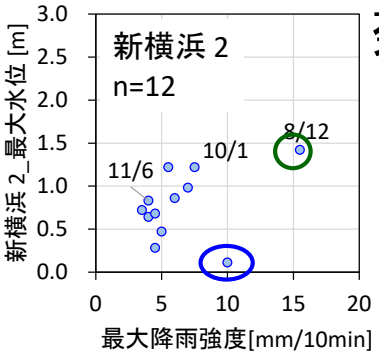
最大管内水位と降雨強度との関係



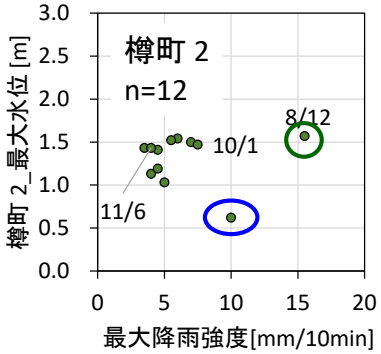
新羽末広幹線へ
接続する雨水幹線



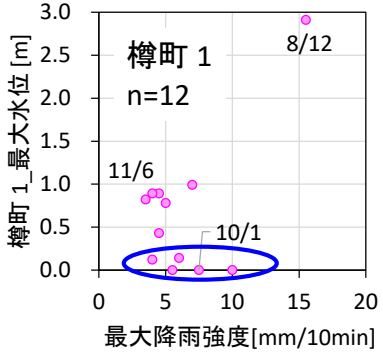
菊名合流幹線



樽町２合流幹線



樽町１合流幹線



◆ *日吉（AMEDAS）の雨量データでは、最大水位と10分降雨強度との間に明確な関係は見い出されず、XRAINデータなど降雨空間分布を考慮した解析をする必要がある。*

まとめ：水位のリアルタイムセンシング

- 鶴見川流域のポンプ排水区においてマンホールアンテナを設置して、リアルタイムに水位上昇を計測した結果から新横浜2と樽町1, 2地点では、降雨に伴う顕著な水位上昇が頻繁に観測され、合流幹線特有の水位上昇現象が見受けられた。
- 新羽末広幹線へ接続する雨水幹線に位置する新横浜1, 3地点では、10分雨量が大きい降雨に対してのみ水位上昇があり、新羽末広幹線への流入を確認することができた。

⇒ マンホールアンテナによる水位観測システムを導入することにより、遠隔でリアルタイムに管路内水位をクラウドにデータ収集・蓄積を行うことが可能となる。

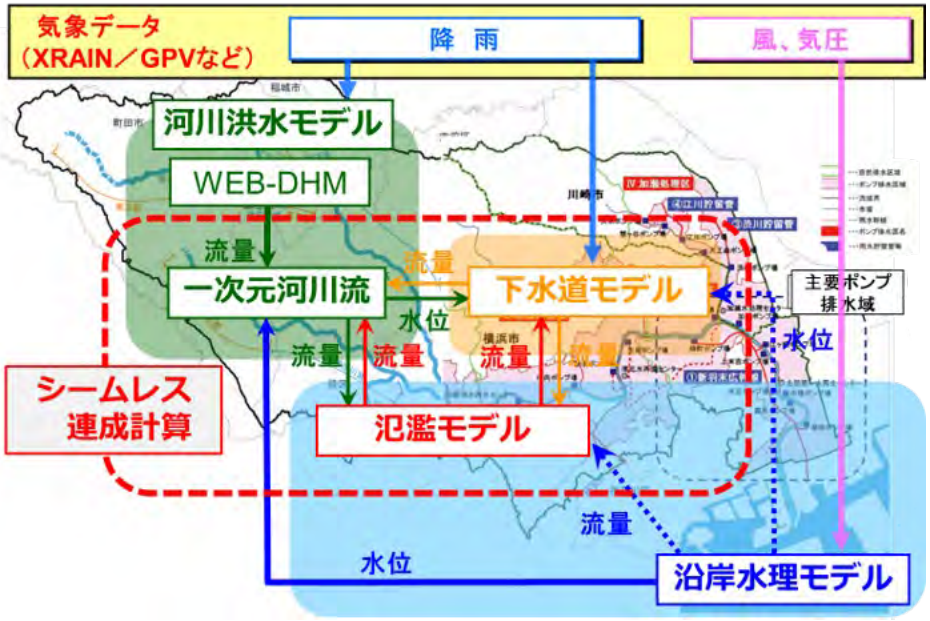
⇒ 管路内水位のリアルタイム観測に加えて、リアルタイム降雨情報や気象庁による高解像度降水ナウキャスト予測情報などを入力とした都市浸水のモデル予測を高精度化することが期待できる。

⇒ 都市浸水リスクを高度に予測するために、浸水解析モデルにデータ同化手法を導入して、予測精度の向上を試みることは意義深い。

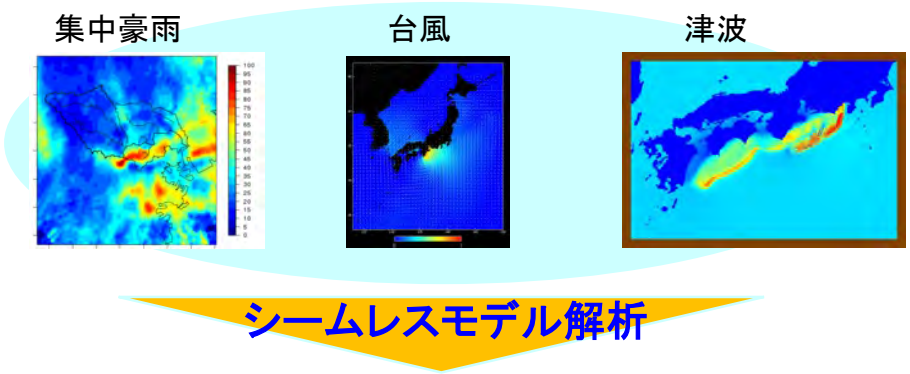
都市浸水、河川洪水、沿岸の一体的なハザード予測

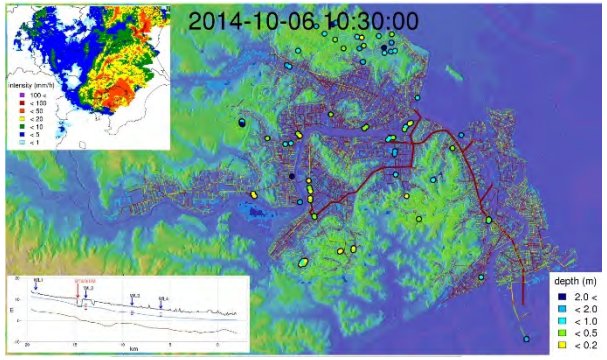
シームレスモデル

高速化された河川・下水道・海岸の各要素モデルを一体的に解くことで、各氾濫因子の相互干渉を考慮しながら、外水氾濫、都市浸水、高潮氾濫などをリアルタイムに解析



シームレスモデル概略（佐貫ら、2016）

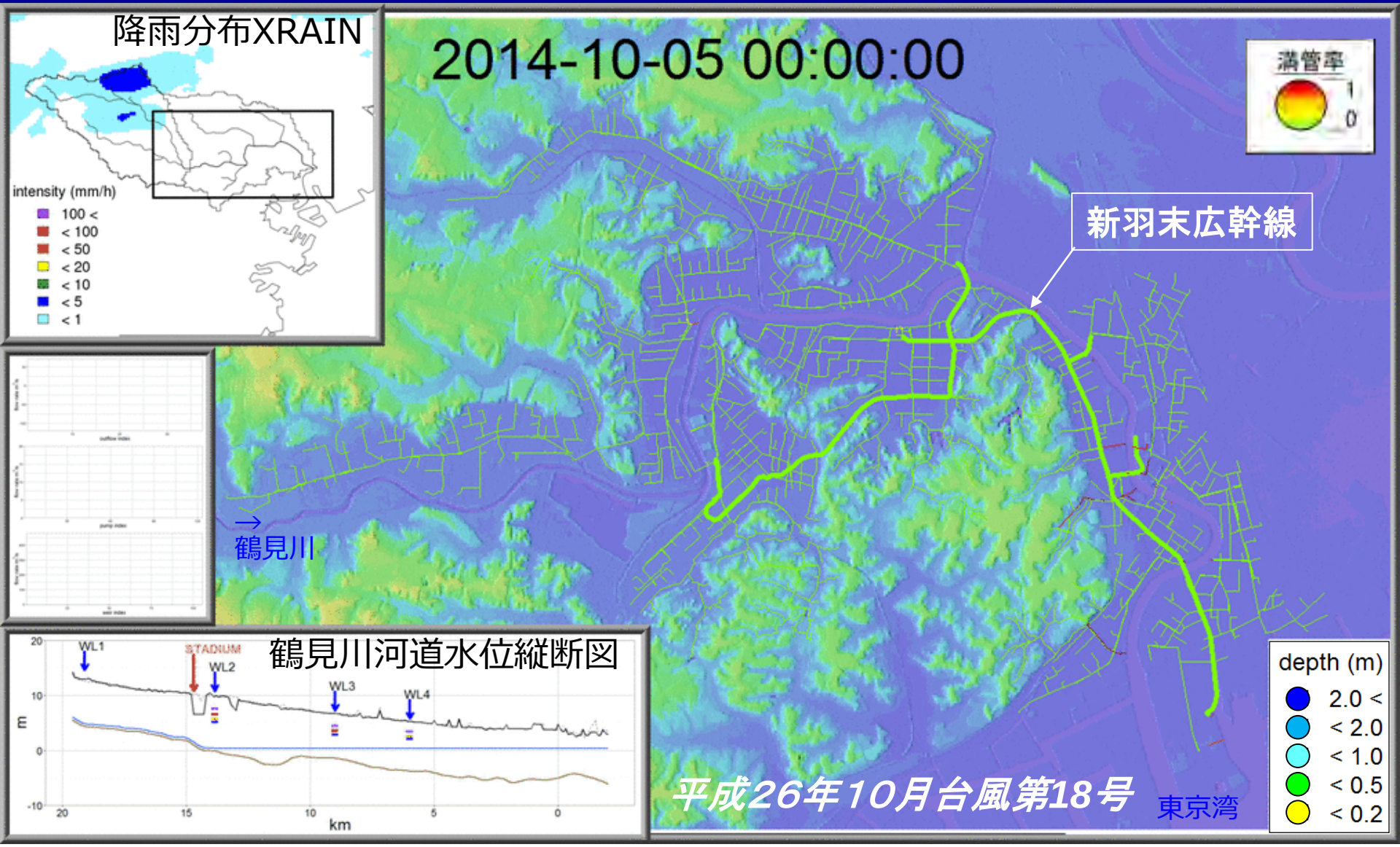




複合的な外力に対する高速かつ一体的なハザード予測を実現

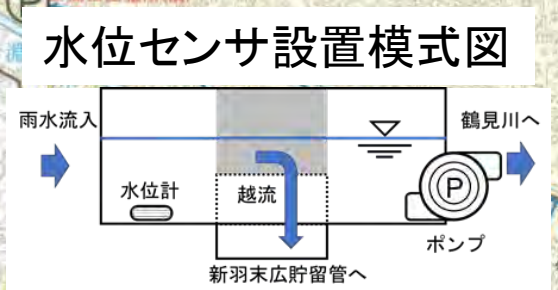
アウトプット *河川洪水流量と河道水位*
下水道管渠網水位とポンプ排水量
海岸堤防、河川堤防からの外水氾濫
マンホールからの吹き出し等の都市氾濫

シームレスモデルを用いた浸水解析事例



鶴見川流域（横浜市）の台風時における浸水解析事例
観測降雨等を入力として、河道水位、下水道水位、浸水深等が解析され可視化される

研究対象領域：鶴見川流域都市部（横浜市）



③北綱島

①江ケ崎

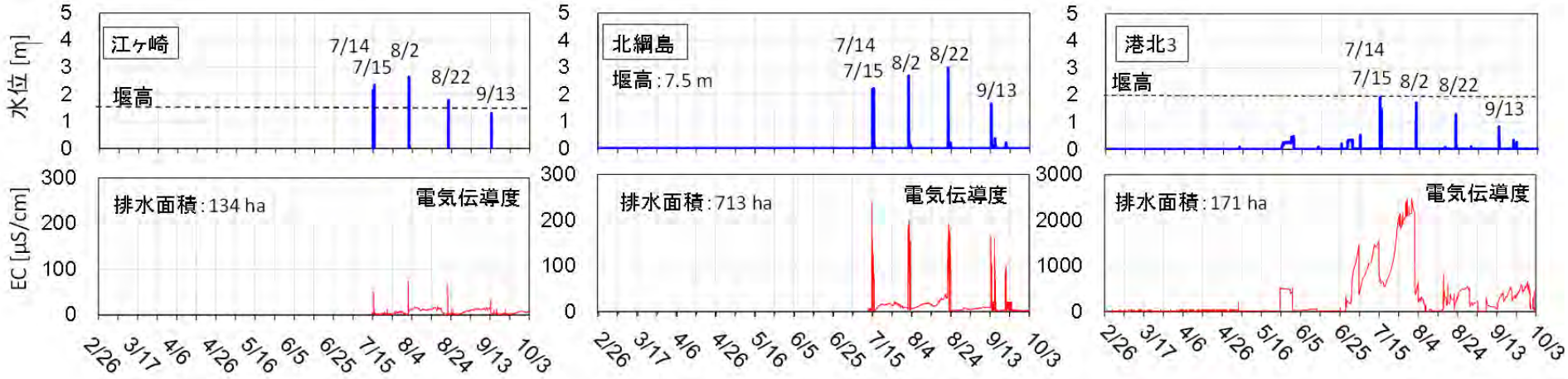
②樽町

④港北

下水道管内水位観測の様子(GAIAプロジェクト)

① 江ヶ崎ポンプ排水区
② 樽町ポンプ排水区
③ 北綱島ポンプ排水区
④ 港北水再生センター排水区

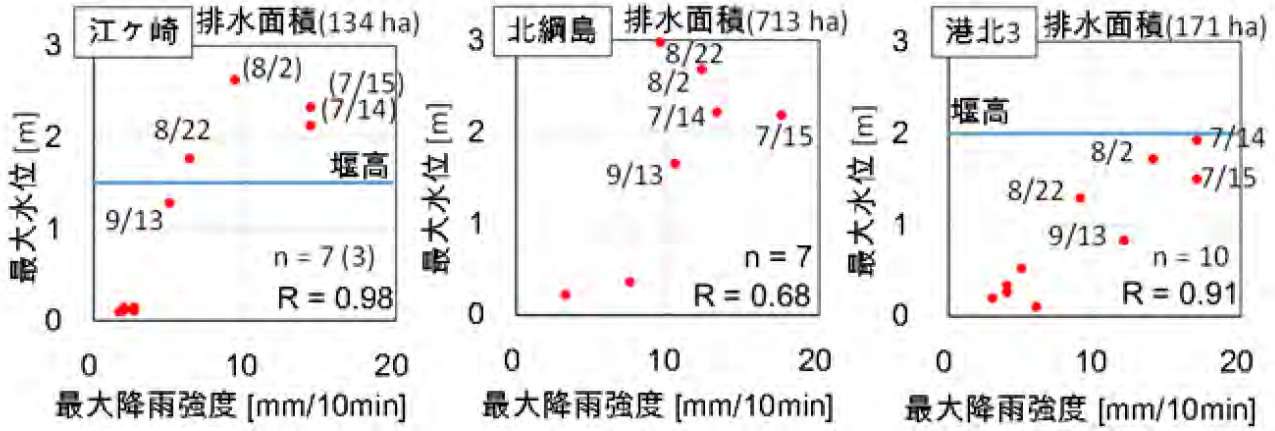
水位、電気伝導度の常時計測データ（2016年2月～10月）



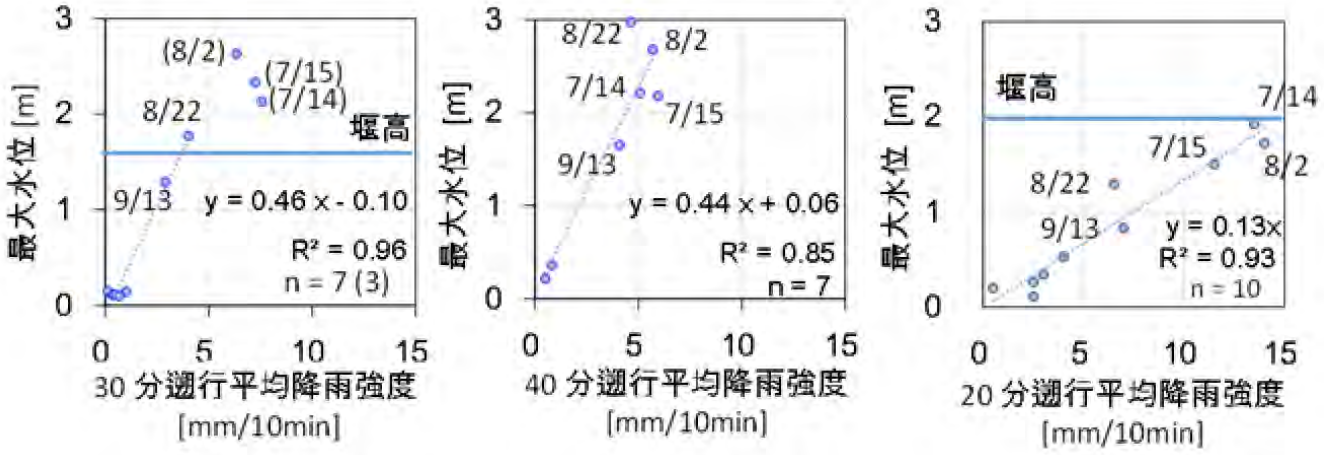
- 弱い雨では管内水位がセンサまで上昇せず、強雨時のみに雨水幹線を流れる下水がセンサに到達して、水位とECが計測
- 顕著な水位上昇が7月から9月にかけて5回計測、10cm以上の水位計測としては北綱島で7回、江ヶ崎と港北3でそれぞれ10回
- 江ヶ崎地点で4回の越流が想定されるが、北綱島と港北3地点では越流が発生していないものと推定、綱島では堰高からかなり低い状況
- 江ヶ崎地点のEC最大値が70-80 μS/cmを超えることがない。北綱島地点では最大値は100～250 μS/cmの範囲にあり、雨水による希釈の程度が少ない下水が雨水幹線に流入しているものと推察

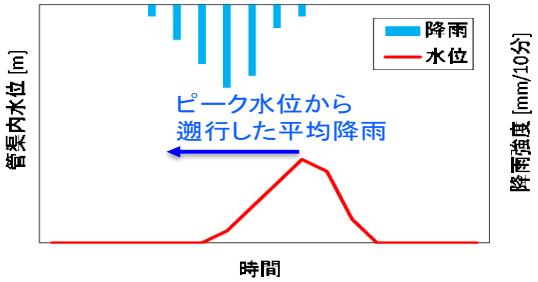
降雨強度と最大水位との相関関係

10分間最大降雨強度と最大水位との関係



遡行平均降雨強度と最大水位との関係

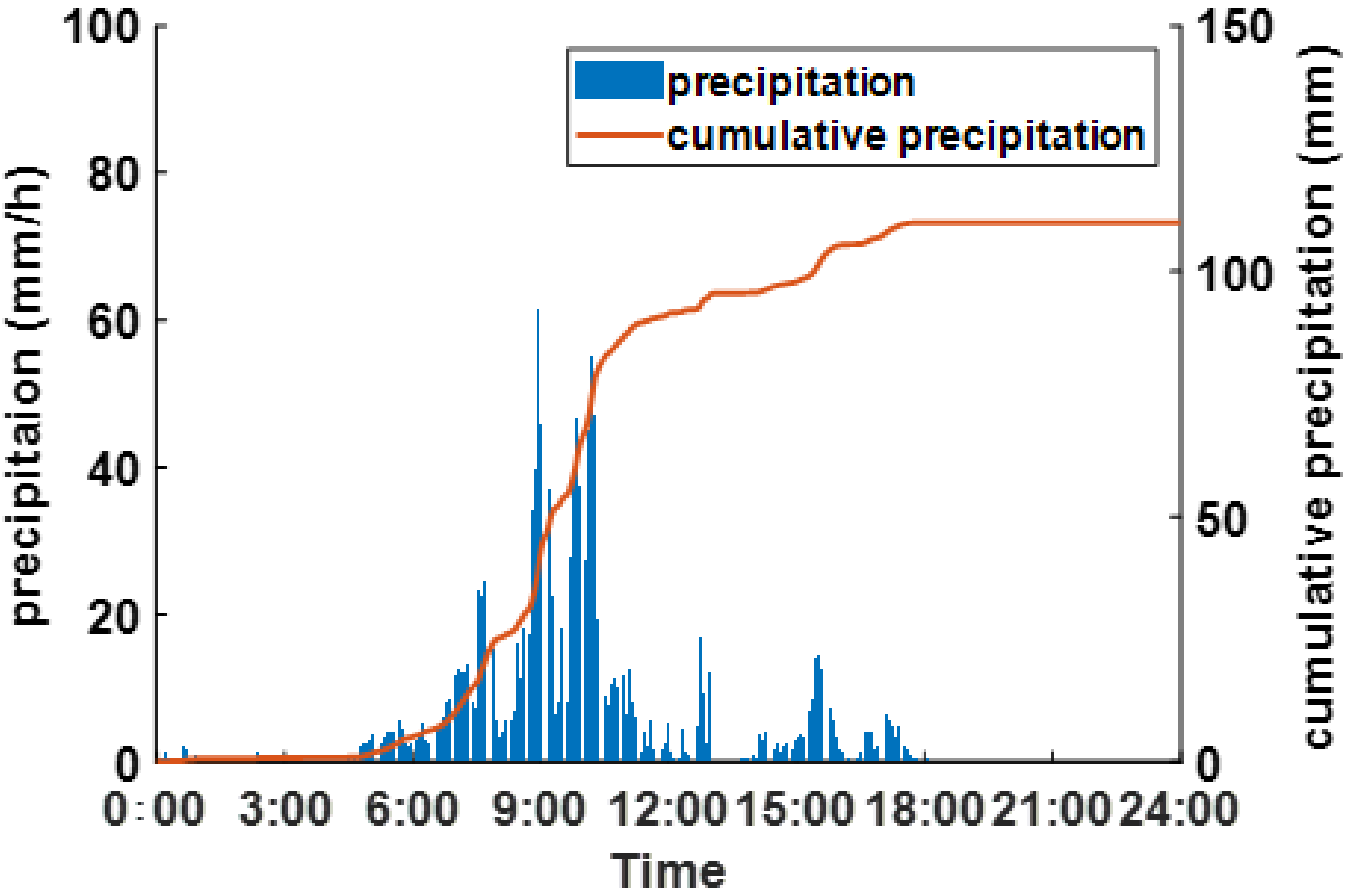




最も強い相関関係が得られた遡行時間
江ヶ崎地点：30分、
北網島地点：40分、
港北3地点：20分

決定係数が0.85以上の回帰式で、高い精度で最大水位が推定できる可能性

2016年8月22日豪雨のハイエトグラフ



モデル解析対象とした、2016年8月22日の台風9号に伴う降雨イベントでは、XRAINによる4排水区の平均累加雨量は109.9mm

観測水位を用いたシームレスモデルの検証

鶴見川浸水解析領域

シームレスモデルでは、リアルタイムな浸水予測を実現させるために下水道網の計算速度を上げるために、径600mm以上の管渠（管渠8766本，マンホール8820個）のみを対象としている。

2016年8月22日豪雨イベント

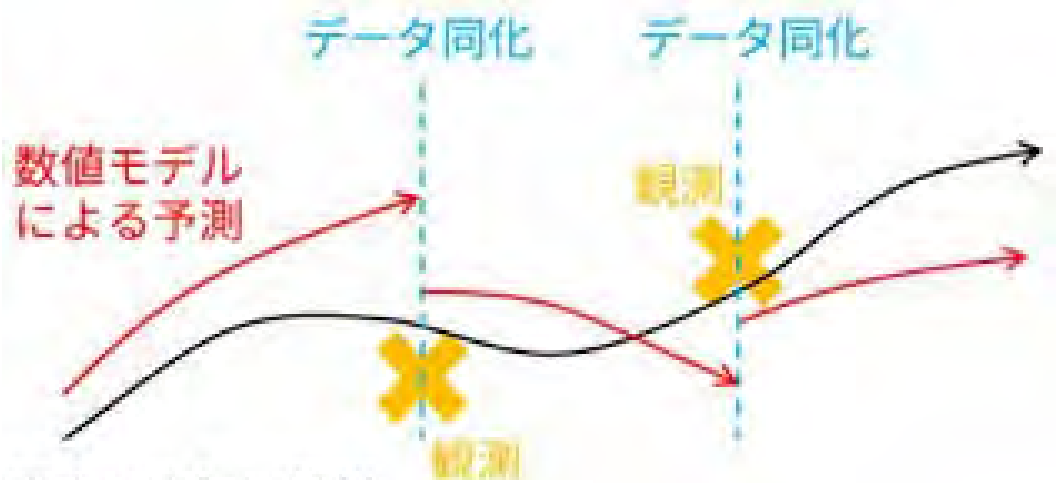
投稿論文図表のため非公開

- ハイドログラフ立ち上がり初期が観測水位と比較して遅れる傾向がある．これは管渠径600mm未満が省かれているため、末端管渠を速やかに流下する現象が表現されていないと考えられる。
- 江ヶ崎と北綱島では観測水位と比較して計算水位のピークが過小評価されているが、樽町地点においては過大評価となっている。
- ポンプ排水の影響を水位は大きく受ける。例えば北綱島地点の場合、上流に位置する高田ポンプ場の運転状況の影響を受けて，複雑な機構をモデル表現できる必要がある。

データ同化（Data Assimilation）

- データ同化とは、数値シミュレーションに実測データを取り入れる手法であり、データをシミュレーションに埋め込み、馴染ませて、実際に起こっている現象をうまく、賢く説明することを目指す手法である。
- シミュレーションでは、初期条件、境界条件、パラメータなどを与える必要があるが、それらは、時として正確ではなく、不確実性がある。データ同化は、よりよい初期条件を設定することで、観測できない時間や場所における現象をもっともらしく推定可能となる。

- 実測データを踏まえた初期条件、境界条件の設定によるシナリオ計算をするための手法であり、管路内水位の実測データを取得することで、都市浸水モデルの予測の精度の改善が可能となる。



現実の管路内水位の状態

データ同化手法を組み込む意義

- 非線形な水位変化応答を示す下水道網に対して，少ない観測情報に基づきながら解析結果を評価し、データ同化などの手法を使うことで誤差を改善することが期待できる。
- 例えば、雨水貯留管においては、末端部でポンプ施設に接続しているため、管渠の水位はポンプ場における排水の影響を強く受けることが推測される。
- 河川と下水道を一体的に解く都市浸水解析モデルの特に管渠水位の予測精度を向上させることを目的として，ポンプ施設に接続する雨水管渠や貯留管における観測水位を活用して検証を行うことは意義深い。
- 得られた誤差評価を踏まえ，雨水管渠水位の予測精度を向上させるために，下水道網水位の事前計算情報を活用した同化手法の有効性を検討する。

データバンク型同化手法

気象分野等で適用されるデータ同化手法である、局所アンサンブル変換カルマンフィルタの代わりに、データバンクを活用した同化手法を適用する.

本手法では、大規模数の仮想降雨パターンに基づく下水道網の水位分布について事前に計算しておき，データ同化時刻において4地点の観測水位と対応する計算水位の平均二乗誤差が最も小さくなる水位分布の組を初期値として適用する。

投稿論文図表
のため非公開

同化手法を組み込んだシームレスモデルによる解析

投稿論文図表
のため非公開

- 30分毎にデータ同化を行ったところ、いずれの地点においても同化によって予測精度が大きく向上している。
- 江ヶ崎や樽町のように同化前には表現することの難しかった複数のピーク水位に対しても，それが予測可能となっている。また、北綱島地点においても適切な水位に補正されている。
- 詳細な下水道網の情報を全て計算しない場合でも，事前計算のデータバンクに登録されていた水位情報を活用することで，管渠水位を精度よく解析可能なことが示された。
- 樽町地点については11時付近や23時付近など，観測水位以上に急激な水位低下がみられる。このずれの原因をさらに究明する必要がある。

今後の研究の構想と展開

新たに開発した技術やシステムの横浜市ポンプ排水区全域と地方都市への導入とその運用

1）管路水位等のリアルタイムセンシングシステムの構築
2）リアルタイム観測情報によるデータ同化モデルによる高精度浸水予測システムの構築
3）観測情報/予測モデル情報等を統合集約するクラウドサーバ管理システムの構築
4）下水道ストックのリアルタイム制御手法の確立
5）ラストワンマイルを埋める危機対応ナビゲーターの構築

浸水・氾濫予測情報に基づく河川と下水道の一体的な浸水対策や施設管理制御システムの構築

防災の観点から被害軽減のための避難行動の誘導システムや浸水防止計画の立案手法の構築

本格研究実施後の未来社会構想

- 気候変動に伴う降雨パターン変化に対応した都市浸水対策の高規格化
- 水防関連部局における浸水リスク情報の共有と地域社会への効果的な提供
- スマートな都市浸水リスク制御・管理技術のビジネスモデルの創出

研究成果の波及及び将来展望

浸水・氾濫予測情報に基づく河川と下水道の一体的な浸水対策や
施設管理制御システムの構築
防災の観点から被害軽減のための避難行動の誘導システムや
浸水防止計画の立案手法の構築

ICT技術を駆使した、都市浸水から安全で安心な災害レジリエンスの高い社会の構築

リアルタイムの水位監視センシング技術の運用

システムの普及

DIAS上でオープンソース化したモデル

他都市への展開

横浜市ポンプ排水区から地方都市への普及・展開
さらには、アジアへ

スマートな都市浸水リスク制御・管理技術のビジネスモデルの創出

合流式下水道雨天時汚濁対策への活用

避難誘導や地域住民の防災リテラシーの向上

ご清聴ありがとうございました。

下水道展’19 横浜　併催セミナー

「都市浸水リスクのリアルタイム管理・制御への挑戦」

主催：東京大学社会連携講座　共催：横浜市環境創造局

話題提供

1）社会連携講座と未来社会創造事業

2）水位等のリアルタイムセンシング

3）浸水解析におけるデータ同化技術

4）将来の研究展開

〒113-8656　東京都文京区本郷7-3-1
東京大学大学院工学系研究科
古米　弘明　E-mail : furumai@env.t.u-tokyo.ac.jp