

## 〈特集〉

## 気候変動を踏まえた都市浸水リスク管理の高度化

古 米 弘 明

東京大学大学院工学系研究科 附属水環境工学研究センター  
 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 E-mail: furumai@env.t.u-tokyo.ac.jp)

## 概 要

気候変動の影響を受け、集中豪雨等に伴う浸水・洪水などの災害の多発が社会問題となっている。河川のみならず、都市基盤施設である下水道においても都市水害への対応に迫られており、都市浸水予測に関する情報の収集や提供、災害防止方策の高度化が必要となってきている。本稿では、気候変動を踏まえた下水道による浸水対策の推進について紹介しながら、都市浸水解析モデルとリアルタイムセンシング技術を活用することで既存ストックを最大限活用する方策など、都市浸水リスクを高度に管理する方向性について述べる。

キーワード：気候変動，都市浸水解析モデル，リアルタイムセンシング，ストック活用

原稿受付 2021.5.9

EICA: 26(1) 2-6

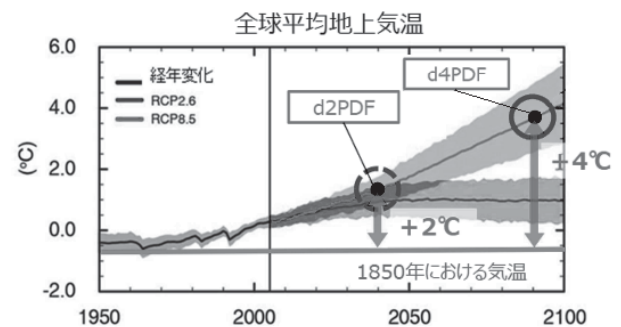
## 1. はじめに

近年、全国各地で集中豪雨や局地的大雨が頻発しており、明らかに気候変動の影響が現れている。従来の経験が単純には通用しない現象に対処することが、今後一層求められる。このようななか、令和元年10月に「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言が公表された<sup>1)</sup>。将来の気温上昇を2℃以下に抑えるという目標に相当する代表的濃度経路 RCP2.6 を前提にした将来の降雨量の変化倍率を設定して、治水計画の目標を定めるとともに頻発する豪雨による被害を軽減し、最小化するための方策を検討することとされた。

都市における浸水対策を担う下水道分野でも、令和2年6月末に提言「気候変動を踏まえた下水道による浸水対策の推進について」が公表された<sup>2)</sup>。そして、令和3年4月には、気候変動適応技術社会実装プログラムの2℃上昇における将来降雨に関する最新モデル計算結果に基づいて、一部改訂がなされている。

今回提示された降雨量変化倍率は、RCP8.5の2℃上昇時点を前提に解像度5kmでアンサンブル計算を行ったd2PDFによる値をもとに、設定したものである(Fig. 1)。したがって、積乱雲の発達等の短時間スケールの場合、降雨量変化倍率が今回設定した値より大きくなる可能性もある。すなわち、現時点では、都市浸水対策に係る計画の対象としている降雨及び流域面積、降雨継続時間、都市気候については、現在の気候変動予測モデルで適切に再現するには限界があることに留意する必要がある。

このような気象学や水文学分野の気候変動のもとで発生しうる降雨に関する科学的知見を活用することと



(4℃上昇，温室効果ガス2090：d4PDF，2℃上昇，温室効果ガス2040：d2PDF.)

Fig. 1 1986～2005年平均に対する全球平均地上温度の変化：RCP8.5シナリオにおける定常実験

なった。これは、「再度災害防止」に加えて、将来予測データを活用する「事前防災」の整備計画への転換を促すものである。すなわち、水災害が激甚化・頻発化するに対応するために、ハード整備の加速化・充実や治水計画の見直しに加え、上流・下流や本川・支川の流域全体を俯瞰し、国や流域自治体、企業・住民等、あらゆる関係者が協働して取り組む「流域治水」の方向性が示された<sup>3)</sup>。そして、令和3年4月28日には、特定都市河川浸水被害対策法、河川法、下水道法、水防法を含む9つの法律が改正された。

気候変動の影響を受け、集中豪雨等に伴う浸水・洪水などの災害の多発が社会問題となっていることに対応するために、河川のみならず、都市基盤施設である下水道などの公共施設においても災害への対応に迫られている。都市浸水予測に関する情報の収集や提供、災害防止方策の高度化が必要となってきている。

本稿では、まず、前述の下水道による浸水対策の推

進に関する提言ポイントを紹介しながら、気候変動への適応策としての都市浸水対策のあり方や浸水解析モデルとリアルタイムセンシング技術を活用することで既存ストックを最大限活用する方策など、都市浸水リスクを高度に管理する方向性について述べたい。

## 2. 下水道による都市浸水対策の推進

令和元年台風第19号においては、河川の氾濫等による被災とともに全国15都県140市区町村において内水氾濫による浸水被害が発生した。併せて、下水道施設そのものも被災し、市民生活に多大な影響を与えることになった。

超過降雨による内水被害の発生や河川氾濫等における下水道施設の機能確保も考慮するために、気候変動を踏まえた下水道による浸水対策を推進する提言<sup>2)</sup>では、次の5つの施策が示されている。

- 1) 中長期的な計画の策定の推進
- 2) 施設の耐水化の推進
- 3) 早期の安全度の向上
- 4) ソフト施策の更なる推進・強化
- 5) 多様な主体との連携の強化

まず、気候変動を踏まえた中長期計画の策定、超過降雨における施設の耐水化である。そして、都市浸水リスクを定量的に評価して、「再度災害防止」に加え、計画的に「事前防災」の整備を推進することが求められる。そのためにも、従来型のハード対策に加えて、ソフト対策や既存ストックを活用したより効率的かつ効果的な浸水対策を展開することが必要となる。その際に、そして都市浸水に関わる様々な主体が連携して主体的かつ積極的に取り組むことが求められる。

5つの施策のうち、4) ソフト施策の更なる推進・強化は、本稿で着目する方向性である。河川・下水道部局は、防災部局や都市計画部局等との連携によるリスク低減策を促進させるためにも、内水氾濫に伴う浸水リスク情報や水位・カメラ画像など避難や水防活動につながる情報を多様な手法で提供する強化策が必要である。

まさに、観測情報やデータを利用した都市浸水対策の高度化が求められている<sup>4)</sup>。そこで、次節では著者らが実施してきている未来型の都市浸水リスクの管理の研究を紹介する。

## 3. 未来型の都市浸水リスクの管理の研究

著者らは、沿岸部に位置する都市低平地の排水区ならではの新たな浸水・氾濫予測モデルが必要であると考えていた。そして、河川砂防技術開発研究課題「沿岸低平地における河川、下水道、海岸のシームレスモ

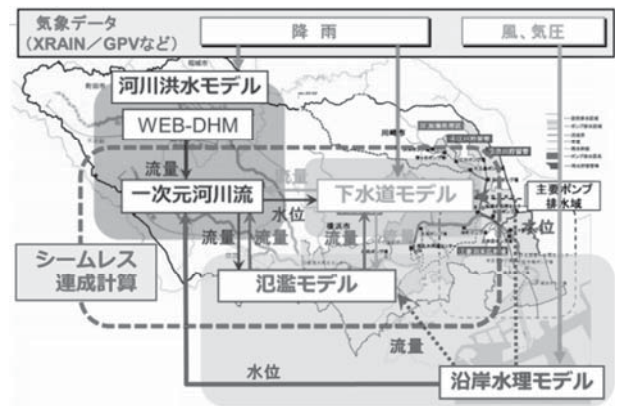


Fig. 2 河川・下水道・海岸の各要素モデルを一体的したシームレスモデル

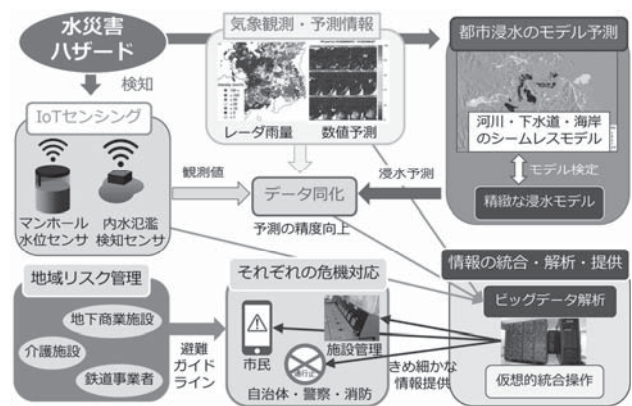


Fig. 3 未来社会創造事業における研究構想図

デルに基づく実時間氾濫予測システムの構築（代表：佐藤慎司，2012-2014年度）」において、河川洪水モデル、氾濫モデルに下水道管路システム、ポンプによる排水機能や沿岸部の水理特性をシームレスに統合したモデルを開発した<sup>5)</sup> (Fig. 2)。そして、実時間での予測のために計算の高速化も検討した。

この成果を基盤として、2017~2019年度には科学振興機構の未来社会創造事業で「都市浸水リスクのリアルタイムの予測・管理制御」の研究を実施した。この研究では、マンホール水位センサやレーダ雨量等の情報をリアルタイムに収集して、数値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）を開発した。そして、気象観測・予測データ、河川や下水管路の水位を用いて解析する新たな浸水・氾濫予測モデルを構築することを目的とした。

それにより、観測情報やモデル予測情報などのビッグデータを統合的に解析して、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リアルタイム制御を実現して、既存ストックを最大限活用する方策の判断をより適切に行うことを目指した。この研究構想図を Fig. 3 に示した。

そして、現在は東京大学大学院工学系研究科の社会連携講座「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/>)で、管渠の観測水位によって精度検証された都市浸水解析モデルの開発を進め、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を構築することに貢献することを目指している。以下に、未来社会創造事業における研究成果を一部紹介する。

### 3.1 下水管内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内の5か所(新横浜1, 2, 3, 樽町1, 2)にマンホールアンテナ等を設置した(Fig. 4)。各地点におけるセンサ設置の深さは、地下約4.2m~57mであり、水位計測は2018年6月末から開始して、降雨時にはリアルタイムで1分間隔でのデータ収集に成功している<sup>6)</sup>。

リアルタイムセンシングデータは、マンホール式アンテナからLTE網を使い、クラウドシステムに10分に1度転送を行う。Fig. 5は、令和元年10月台風

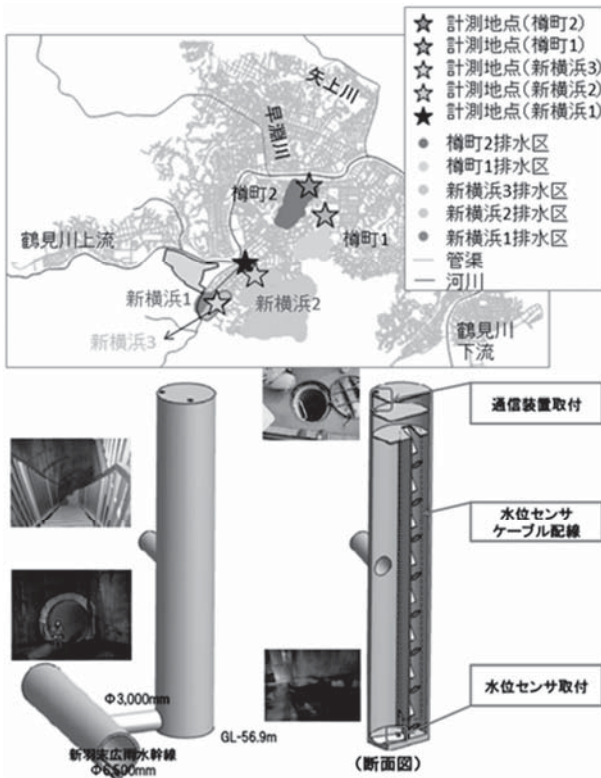


Fig. 4 センサ設置地点と設置の様子(下図:新横浜1の例)

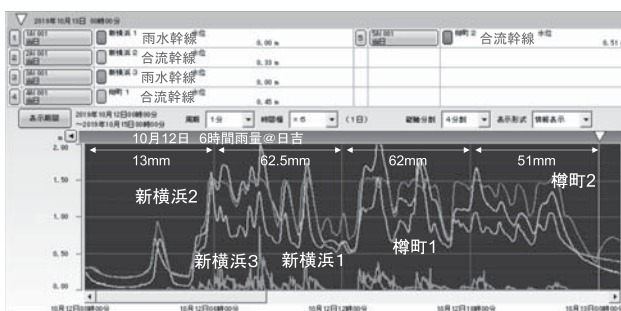


Fig. 5 管内水位の観測結果表示(令和元年10月台風第19号時)

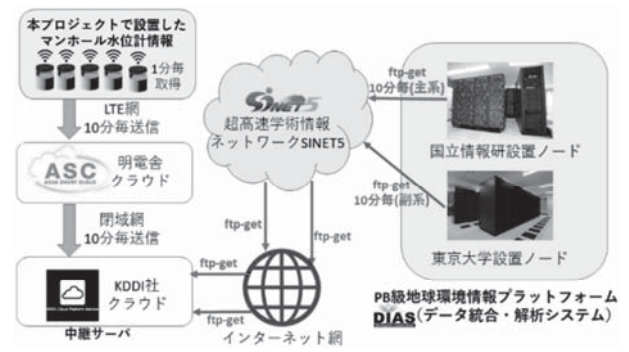


Fig. 6 マンホール水位データの転送システム

第19号に伴う管内水位が上昇した観測結果を表示したものである。5地点の水位観測データを収集・蓄積を行うことで、内水氾濫に至る情報も取得可能となる。そして、様々な降雨におけるデータを用いてシームレスモデルの検定や検証を行うことで、モデルの再現性の向上を進めることも可能となる。

同クラウドに蓄積されたデータは中継サーバを介して国立情報学研究所が運用する学術情報ネットワークSINET5と接続し、文部科学省委託事業「地球環境情報プラットフォーム構築推進プログラム」のデータ統合・解析システムDIAS内に設置されたサーバへアーカイブされる。当該データは全く別の拠点に設置された独立したサーバに蓄積されているためデータの損失等の可能性が低く、冗長性を持ったアーカイブ機構が構築されている(Fig. 6)。

### 3.2 リアルタイム情報を活用したデータ同化手法

管内水位の観測値は、排水状況の把握や今後の内水氾濫の危険性を想定するために有効である。また、この観測値を用いて都市浸水解析モデルの管内水位の計算値を補正することで、浸水予測精度を向上させることも可能である。

その方法はデータ同化と呼ばれる。データ同化は気象や津波の予測の分野ですでに導入されている手法で、数値シミュレーションに実測データを取り入れ、埋め込み、馴染ませて、実際に起こっている現象をもっともらしく推定するものである。

本研究では、リアルタイムの観測水位データをモデルに馴染ませる手法として、様々な仮想降雨データシナリオに応じた排水区内の管路内水位空間分布のデータバンクを利用する方法を新たに考案した<sup>7)</sup>(Fig. 7)。これは、膨大な管路網を有する下水道モデルでは、データ同化に用いることのできる管路水位の観測データ数は実用上それほど多くはないことを想定したことによる。そのため、大量の観測データに対する同化に適したLocal Ensemble Transform Karman Filter (LETKF) などではなく、管路内水位のデータバンクを準備して、データ同化を行うこととした。

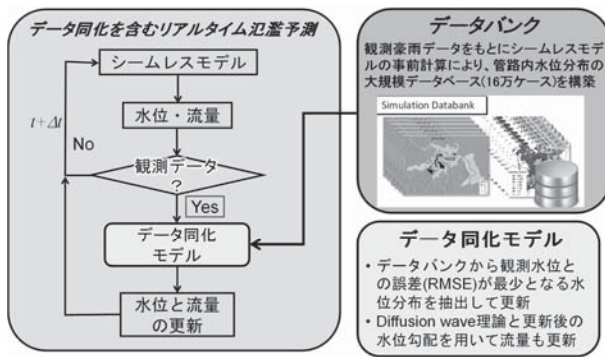


Fig. 7 リアルタイム観測水位を用いたデータバンク型データ同化システム

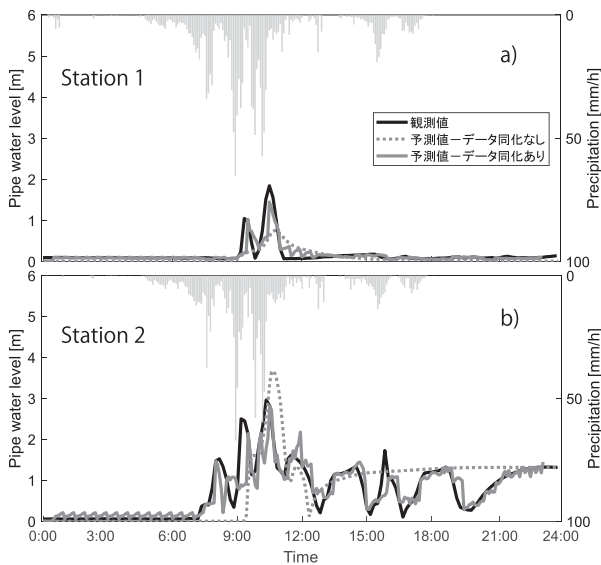


Fig. 8 観測水位の時間変化 (淡線) とデータ同化前 (点線) と同化後 (濃線) の予測値の比較

まず、観測豪雨データをもとに約 16 万ケースの仮想降雨データシナリオを作成して、それを入力値とするシームレスモデルの事前計算により、大規模な管路内水位分布のデータバンクを構築した。そして、データ同化として、5 か所の観測水位とデータバンクの同地点の水位とを比較し、その自乗平均誤差が最も小さいシナリオにおける管路内水位空間分布に更新するという手法を適用した。

データ同化により、管路内水位の再現性を大幅に向上させた事例を Fig. 8 に示す。これは、鶴見川ポンプ排水区で過去に取得した水位データをリアルタイムに入手できたものと仮想して、実降雨データを外力として 30 分間隔にデータ同化を行い、水位予測を行った数値実験の結果である。淡線が観測水位であり、点線はデータ同化前のモデル計算結果で、濃線がデータ同化により再現性が向上できた結果となる。

Fig. 8 b) は、ポンプ所に隣接する地点での水位変化を示している。降雨強度の増加に対応して水位上昇が起こるとともに、ポンプが運転されることで水位が低下するなど水位が複雑に変動する傾向が見られる。

データ同化なしのモデル計算では、降雨後の水位立ち上がりの遅れがあり、それ以降の水位変動を再現できない。しかし、データ同化によって 30 分おきに観測値を反映したことから再現性は格段に高まっている。広範囲で複雑な下水道管路ネットワークを対象として、限られたリアルタイムの観測データを活用して都市浸水解析モデルのデータ同化を実施した世界初の事例である。

### 3.3 浸水予測の高精度化とリアルタイム制御

データバンク型データ同化システムと高速化された都市浸水解析モデルとを統合することで、リアルタイム制御の道筋が立つものと考えられる。具体的には、XRAIN による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や降水短時間予報の情報を入力とした数時間先までの浸水・氾濫の予測<sup>8)</sup>を高精度化できれば、ポンプ所、ゲート、貯留施設のリアルタイム制御を検討することが可能となる。そして、降雨に応じて、既存ストックを最大限に活用する運転管理方法を構築することが期待される。

例えば、令和元年台風第 19 号における世田谷区や川崎市の内水氾濫は、多摩川の水位上昇に伴う河川水の逆流により発生した。排水ゲートを適切に操作できれば浸水被害の軽減が可能であったものと考えられる。ゲート操作は経験だけでは困難である。水位観測とともに降雨予測に基づいて様々なゲート操作シナリオのもとで浸水予測を行うことで、的確な判断が可能となるはずである。

以上のように、管内水位のリアルタイムセンシングとモデルによる浸水予測の技術開発が確立できれば、水位周知下水道制度の積極的な導入の後押しにもなり、河川や防災部局との浸水予測情報の共有にも貢献できると考えている。また、再現性の高い都市浸水解析モデルを用いた施設計画の見直し、さらにはまちづくりや民間と連携した浸水防止計画立案などソフト対策の強化にもつなげることが期待できる。

## 4. おわりに

近年、国や都道府県により河川の危機管理型水位計の設置が進められている。下水道分野においても水位観測や浸水シミュレーションの活用が進みつつあるが、本格的な実装には至っていない。その意味でも、ICT やセンシング技術を活用した管内水位や氾濫水位の観測を積極的に展開するとともに、観測データで検定や検証された都市浸水解析モデルを構築する必要がある。まさに、事業体において“管路内の水位センシングの常識化”と“都市浸水解析モデルの検定・検証の推進”を期待したい。





Fig. 9 都市雨水管理共通プラットフォームのイメージ

さらに、都市計画やまちづくり部局とも連携して雨水流出抑制機能も有するグリーンインフラの充実などに努めることも期待される。そして、大規模貯留施設だけでなく、分散型の施設として既存の雨水貯留浸透施設やグリーンインフラを明確に位置づけて、都市浸水解析モデルにより定量的に導入効果を評価することが望まれる。

また、水位情報や浸水状況を把握することは、河川部局、防災部局と連携した避難行動や水防活動の促進に生かすことにも貢献できる。このように、様々な主体による連携や協働を組み合わせて、気候変動を踏まえた強くしなやかな、未来型の都市浸水リスク管理や雨水流出抑制対策へとつなげることが求められる。

しかしながら、中小の地方自治体では、水位観測や浸水シミュレーションモデル解析を行う人材が十分に確保することも困難であることが想定される。また、自治体が独自に管理を行っている下水道台帳データ、管路内水位のリアルタイムセンシングデータが個別に保有されていることは効率が悪い。そこで、自治体が独自に管理を行っている下水道台帳データのクラウド管理化を進め、管路内水位のリアルタイムセンシングデータも一元化して管理するプラットフォームを構築することは魅力的である。

Fig. 9 に示すように、クラウド上に管理されたレーダー雨量データや下水道台帳データと、リアルタイムセ

ンシング、浸水予測をオンラインでサービスを提供する、都市雨水管理の Software as a Service の開発に取り組むことは意義深いものと考えられる。汎用化されたシステムのもとで、浸水対策だけでなく、合流改善対策等も含め都市雨水管理全般に必要な共通的な情報基盤のプラットフォームを構築することが、将来の気候変動を踏まえた都市浸水リスク管理の高度化につながるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会 (2019) : 「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言  
[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/chisui\\_kentouukai/index.html](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentouukai/index.html)
- 2) 気候変動を踏まえた都市浸水対策に関する検討会 (2021) : 気候変動を踏まえた下水道による都市浸水対策の推進について提言 (令和 3 年 4 月一部改訂)  
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001402868.pdf>
- 3) 国土交通省 (2021) : 流域治水の推進～これからは流域のみならず～  
<https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/index.html>
- 4) 洪尾欣弘, 佐貫宏, 李星愛, 吉村耕平, 田島芳満, 古米弘明, 佐藤慎司 (2017), 都市浸水対策の高度化: 社会課題の解決に向けたデータ活用事例, 情報管理, 60, 2, 100-109  
<https://doi.org/10.1241/johokanri.60.100>
- 5) 佐貫宏, 洪尾欣弘, 李星愛, 吉村耕平, 田島芳満, 古米弘明, 佐藤慎司 (2016), 様々な氾濫因子を考慮した都市沿岸部の氾濫予測解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 72, 2, I\_517-522, [https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I\\_517](https://doi.org/10.2208/kaigan.72.I_517)
- 6) 洪尾欣弘, 古米弘明 (2019), IoT を活用した河川・下水道のシームレスモデルによるリアルタイム浸水予測手法の開発, 下水道協会誌, 56, 675, 32-34
- 7) 洪尾欣弘, 呉連慧, 田島芳満, 山崎大, 佐貫宏, 古米弘明 (2019), 管渠水位の事前計算データバンクを用いたデータ同化による浸水解析の精度向上とポンプ操作の感度分析, 土木学会論文集 B1 (水工学), 75, 2, I\_199-204  
[https://doi.org/10.2208/jscejhe.75.2\\_I\\_199](https://doi.org/10.2208/jscejhe.75.2_I_199)
- 8) 洪尾欣弘, 李星愛, 佐貫宏, 吉村耕平, 田島芳満, 佐藤慎司, 古米弘明 (2018), XRAIN と数値予測雨量の降水特性評価に基づく都市浸水解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), 74, 4, I\_1381, I\_1386  
[https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.I\\_1381](https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.I_1381)