

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06100

研究課題名（和文）河川と下水道の連携による雨水管理技術の開発とタイムライン防災への応用に関する研究

研究課題名（英文）Integrated Rainwater Management Technology for River and Sewer Systems and Its Application in Disasters Timeline

研究代表者

張 浩 (ZHANG, HAO)

高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・准教授

研究者番号：90452325

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 17,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、現地調査、室内実験、数値解析を通して、内外水を一体的に取り扱った都市水害への対処法の開発に関するものである。パイロット地区の河川・下水道における流れの実態と特性を調べ、集中豪雨等に伴う都市水害の発生機構を明らかにした。また、雨水の経路を細かく考慮した高精度流れ・氾濫解析モデルを開発し、実験・実測データを用いた検証を行った。更に、防災施設の利活用や流域排水能力の向上を目指した雨水管理技術と、地元特性を踏まえた能動的な防災行動計画「マイタイムライン」の策定手法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

平成30年西日本豪雨や令和元年東日本台風等連発する災害を機に、豪雨災害における災害リスク・実態把握の遅れ、既存防災施設の限界や高齢者等災害弱者対策の不足などが広く認識されるようになった。本研究で構築できた雨水管理技術と防災行動計画の策定手法は、それらの問題に対して解決案を提示することになり、社会的に意義は高い。また、本研究は現地調査と基礎水理実験により都市水網における流れの水理を解明し、高精度数値モデルを構築した点で学術的に意義は高い。

研究成果の概要（英文）：In this research, integrated management technology has been developed for pluvial and fluvial floods in urban areas with research methods of field surveys, laboratory experiments and numerical simulations. The mechanism of urban flooding has been clarified by continuous investigation of stormwater flows during rainy seasons in a sewer system and a receiving stream in a pilot area. An advanced numerical simulation model has been developed considering rainwater pathways and has been verified with experiment and field data. Moreover, rainwater management methods for the promotion of effectiveness of existing disaster infrastructure stocks and the enhancement of basin-scale drainage capacity, and planning methods for residents-oriented disaster timeline considering localities have been proposed.

研究分野：水工水理学

キーワード：雨水管理 河川 下水道 マンホール タイムライン

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気候変動に伴う雨の降り方の変化、都市域への人口・資産の集中や社会インフラの高度化を背景に、都市豪雨災害は毎年のように発生している。都市豪雨災害は人命や財産を奪い、都市機能を麻痺させる要因となることから、安全・安心な社会づくりの観点からその対策技術の開発は喫緊の課題である。豪雨災害を軽減するために、外水対策においてはダム調節、河道改修、放水路・遊水地建設などが、内水対策においては下水道管網・排水路の強化、雨水貯留・浸透施設の建設、排水機場整備などが行われてきた。一方、これらの豪雨対策は流域に降った雨を分担し合い、お互いの影響を考慮せずに別々に排水計画が立てられることが多い。しかし、実際の出水時には、河川は下水道からの排水により流量・水位が局所的に増加し、下水道は放流先河川の水位によって排水条件が変化する。豪雨時には河川・下水道の相互影響により、流出・氾濫形態が変化する。豪雨の増大や頻発傾向を予想される中、いままでのような河川・下水道の個別の施設整備・運用計画だけでは効果的・効率的に豪雨災害を対処できず、河川・下水道が連携した新しい対策や運用およびそれらに伴う学問・技術の向上が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、極端気象等に伴う都市域の豪雨災害の防止と軽減を目指すものであり、都市域の地上・地下での流れの時空間特性を解明し、雨水管理としての河川・下水道の連携運用に必要な解析技術とタイムライン式防災行動計画手法の構築を図る。具体的目的は下記である。①河川・下水道における流れの実態と特性を調べ、集中豪雨等に伴う都市水害の発生機構を明らかにする。②高精度流れ・氾濫解析技術を開発し、実験・実測データを用いた検証を行った上で、流れの予測・制御技術を確立する。③河川・下水道の連携やタイムライン式豪雨防災行動計画の策定を支える手法と技術を構築する。

3. 研究の方法

本研究は、現地調査、数値解析、室内実験と社会実装に向けたシナリオ創出を実施した。具体的方法は下記である。①高知市久万川・紅水川流域と初月排水区を対象とし、小型 X-band MP レーダーによる雨量観測、河川と下水道の代表地点における水位観測システムを構築し、豪雨時における雨水の挙動を調べた。また、平成 30 年 7 月豪雨に伴う西日本洪水・浸水災害調査を行い、特に高知県宿毛市における内外水氾濫の実態と発生機構を調べた。②高知大学農林海洋科学部利水工学実験室に導入された内水排水システム模型を用いて、ポンプ排水流量が放流先河川の水位に与える影響に関する水理実験を実施した。また、京都大学防災研究所で下水道マンホール内の局所流とエネルギー損失に関する基礎実験を行った。③地上・地下一体型流れ・氾濫解析における主な課題と方向性をレビューした上で、降雨時における雨水の移動経路をより忠実に再現できる数値モデルを開発した。また、平成 26 年 8 月に発生した高知市浸水災害の実績データを用いて、数値モデルの検証を行った。④内外水氾濫リスクを考慮したポンプ等防災施設の運営管理方法の改良シナリオを提案した。また、防災計画の高度化を目指し、住民の能動的な防災行動を支えるマイタイムライン策定方法を検討した。

4. 研究成果

本研究では、豪雨時における河川・下水道の流況、市街地の浸水状況および災害リスクをいち早く把握するため、効率的な観測手法と観測体制を構築し、流れと氾濫プロセスを高精度で予測できるモデルを開発した。また、現地観測と予測情報を用いて、ポンプ等防災ストックの効率的な運営管理方法を提案し、住民の効果的な防災行動計画を支えるマイタイムラインの策定方法を開発した。これらの研究成果の組み合わせによって、豪雨災害の防止と軽減に向けたソリューションを下図に示すように提案した。

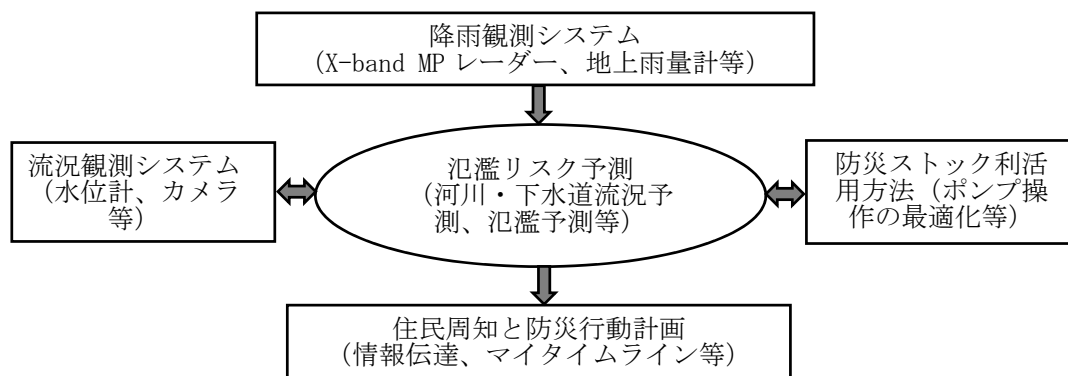


図1 豪雨災害の防止と軽減に向けたソリューション

研究成果の詳細は下記の通りである。

(1) 河川・下水道における流れの特性と豪雨災害の発生機構

太平洋に面する高知県は、年間降水量が 2500mm を超え、時間雨量 50mm を超える集中豪雨も多発する日本有数の豪雨地域であり、過去には数多くの豪雨災害を経験した地域である。本研究で

は、平成 26 年に内水と外水氾濫の生じた高知市国分川・紅水川流域と初月排水区をモデル地区とし、継続的な観測体制を構築し現地調査を実施した（図 2）。現地調査においては、高知大学朝倉キャンパスと物部キャンパスに既に設置された X-band MP レーダーシステム 2 基を生かした降雨観測に加え、同一の出水イベントにおいて代表的な下水道マンホール内の水位と放流先である紅水川の水位を安価な圧力水位計を用いて同時に観測することにより、都市水網における流れの実態を把握した。また、下水道の末端にある初月内水排水ポンプの操作実績を調べ、排水流量が流れの時空間特性に与える影響を検討した。更に、現地調査結果を踏まえ、数値シミュレーションと室内実験を実施し、河川における流れの詳細や排水ポンプの操作方法が河川流に及ぼす影響評価を行った。

研究結果から、感潮河川である紅水川は潮汐の影響および久万川本川合流部以下の影響を受けやすい、豪雨時には降雨強度の影響は強くなることが判明された。ポンプ場から河川への排水がある箇所の上流では水位変動特性がポンプ稼働時とポンプ停止時と異なることや、ポンプ排水がポンプ場内の水位に強い影響を与えることが確認され、ポンプ排水流量の変化により内外水氾濫リスクが変わることが確認された。一方、ポンプ場の標高が対象下水道管渠よりも低いいため、ポンプ排水は対象下水道内の水位に直接影響しないことが分かった。また、大雨のとき、下水道とつながる排水渠への逆流現象が確認され、内水氾濫が生じる大きな原因の一つと考えられる。現地観測結果の一例として、2018 年 9 月 30 日の豪雨時における河川（ポンプ場上流 3 カ所と直下流の 1 カ所）と下水道（マンホール 4 カ所）内の水位変動、降雨強度、ポンプ排水流量、高知港潮位等の関係を図 3 に示す。

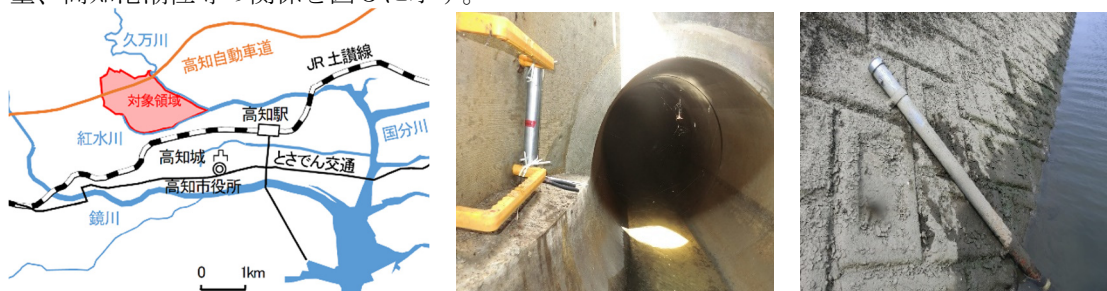


図 2 観測対象領域及び下水道・河川代表地点における水位計の設置状況

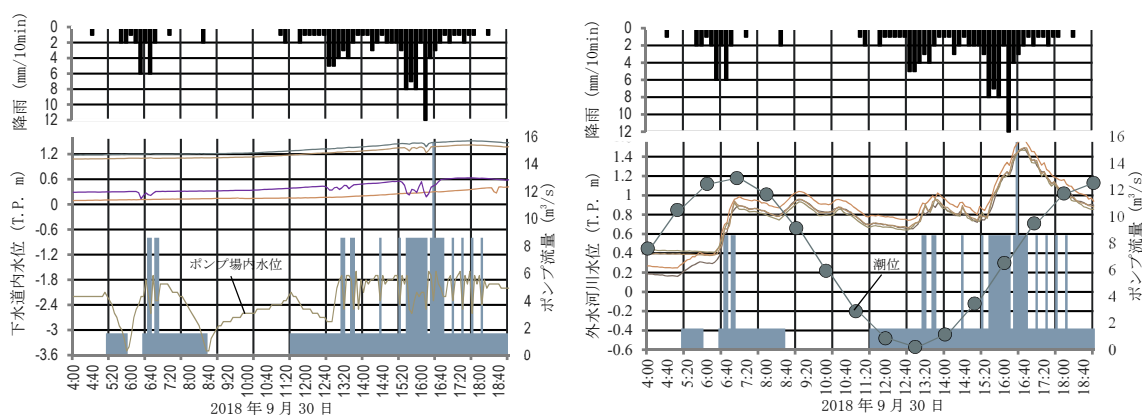


図 3 豪雨時における下水道及び放流先河川内の水位変動一例

本研究実施期間中において、平成 29 年 7 月九州北部豪雨、平成 30 年西日本豪雨や令和元年東日本台風等連発する災害が日本を襲った。特に平成 30 年西日本豪雨における高知県宿毛市の内水氾濫災害調査を実施した結果、様々な氾濫形態が確認され、内外水の相互影響や豪雨に伴う内水氾濫の発生機構が排水システムの仕組みにより大きく異なることが明らかとなり、内外水一体型雨水管理対策の重要性が示唆された。

下水道の流下能力評価及び都市域の氾濫予測においては、管渠が会合するマンホール部のエネルギー損失の評価が重要である。マンホール部のエネルギー損失評価手法の高度化やマンホールが下水道管渠流れに及ぼす影響評価を図り、京都大学防災研究所の基礎実験施設を生かし様々な室内実験を実施した。実験においては、3方向接合型マンホールを対象とし、マンホール形状、主管・支管の接合角度、管内流量、下流水深などがエネルギー損失に及ぼす影響と、エネルギー損失過程において無視できない大規模渦などに代表されるマンホール内の流れ構造を調べた。局所エネルギー損失係数に関する基礎理論式を導出し、実験結果を用いたチューニングを行い、支配的要因の抽出とともに、損失係数を評価する半経験式を提案した。また、粒子画像流速測定法（PIV）を用いて、下水管渠主管・支管の接合角度によるマンホール内の局所流の違いについて可視化と定量化を実施した結果、マンホール内では複雑な渦に代表する 3次元性の強い流れが存在し、主管および支管からの流入水の衝突によって生じる流れ構造は接合角度によって全く異なることが明らかになった。図 4 では実験装置のスケッチと接合角度 45° の場合、代表的横断面と縦断面における流れの流速ベクトルを示す。

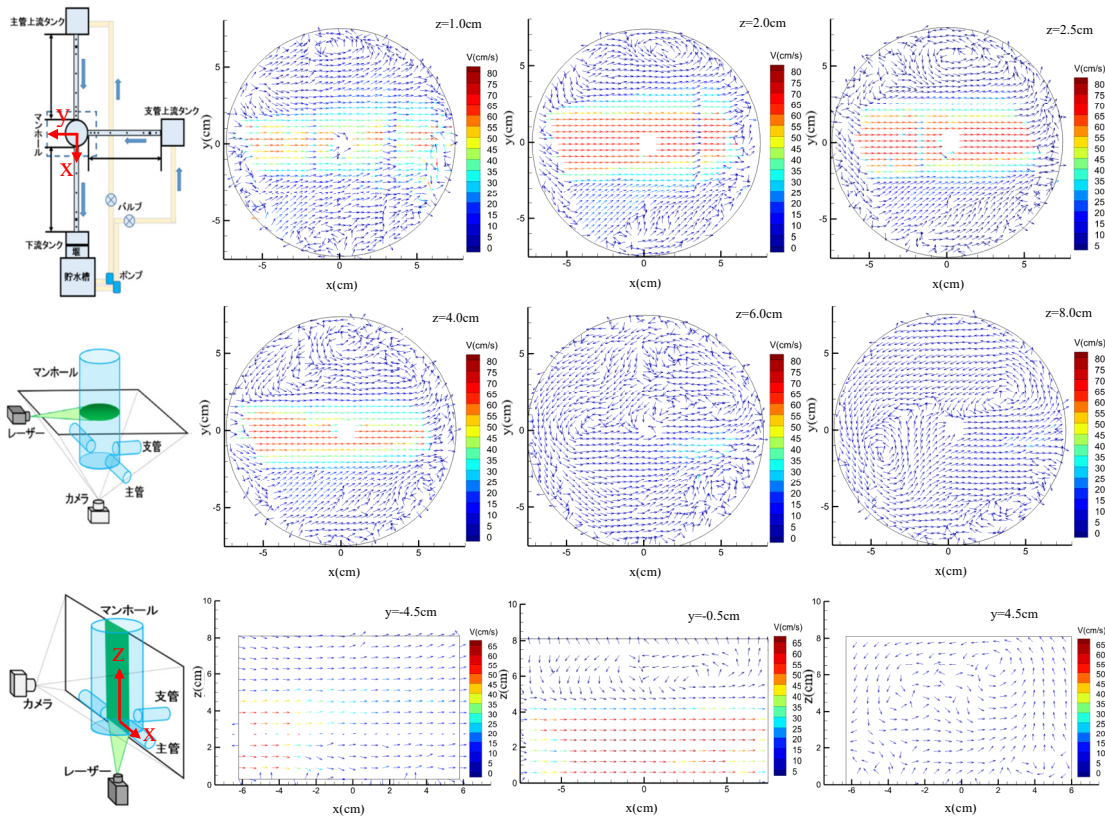


図4 実験スケッチとマンホール内の代表断面における流れ構造（主管・支管接合角度 45°）

(2) 災害リスク予測のための内外水一体型高精度流れ・氾濫予測数値モデル

本研究では、複雑な構造物と地形を忠実に再現できる非構造格子を用いた地上2次元流れモデルと大規模下水道管渠システムに適用可能な1次元モデルの組み合わせによって高精度流れ・氾濫予測数値モデルを構築した。特に、地上・地下での雨水の授受関係のモデル化に力を入れた。マンホールまたは雨水樹を介した流量交換のような従来の取り扱いと異なり、雨水の移動経路を細かく追跡できるモデルを提案した。新しい地上・地下接続モデルは、図5に示すように、地上部に降った雨水が側溝へ流入し、雨水樹で集水され、下水道に排水されるような現状に即したモデルとなっている。地表面と下水道管渠網の間の雨水排水／逆流の過程において、側溝関連施設を経由する経路を考えるため、地上部一側溝間、側溝一雨水樹間、雨水樹一下水道管渠間の流量交換式を新たに提案した。

平成26年8月に発生した高知市浸水災害に関する再現シミュレーションと様々なシナリオを用いた予測に関する検討を行い、全計測地点における実績痕跡浸水深と解析最大浸水深と比較した結果、モデルの再現性を確認できた。今回提案したモデル（改良モデル）による解析と側溝の容量を考慮しない従来モデルによる解析の結果を比較してみると、両者のピーク水量に顕著な差が見られ、豪雨時における側溝の貯留効果が確認できた。また、側溝容量の増加に伴い、地上部の雨水及び下水道管渠からの逆流流量を貯留する容量が増加するため、地上部の最大浸水深及び最大浸水水量が減少するのは分かった。従来・改良モデルによる解析結果から、排水過程の違いが内水氾濫の発生時刻や降雨強度の変動に応じた地上部の浸水水量の変動率に大きく影響することが分かった（図6と図7）。一方、側溝の容量を従来モデルの雨水樹の容量に含ませた場合、側溝関連施設での雨水移動を考慮した新しいモデルと比較してもピークの浸水状況はほとんど変わらなかった。したがって、氾濫の発生時刻や氾濫プロセスよりも最大浸水深を知るためであれば、従来の解析モデルの雨水樹に側溝の容量を持たせることでモデルの簡略化を図ることは可能である。

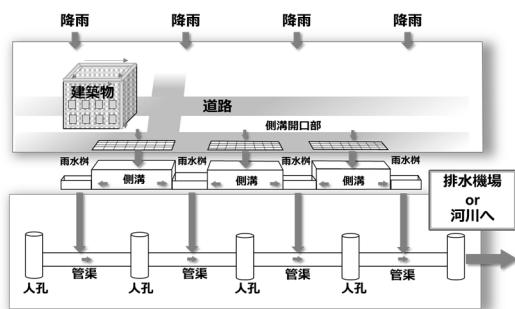


図5 雨水経路を考慮した模式図

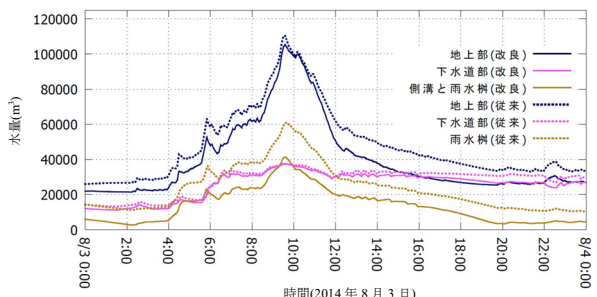


図6 各部に存在する水量の時間経過（解析例）

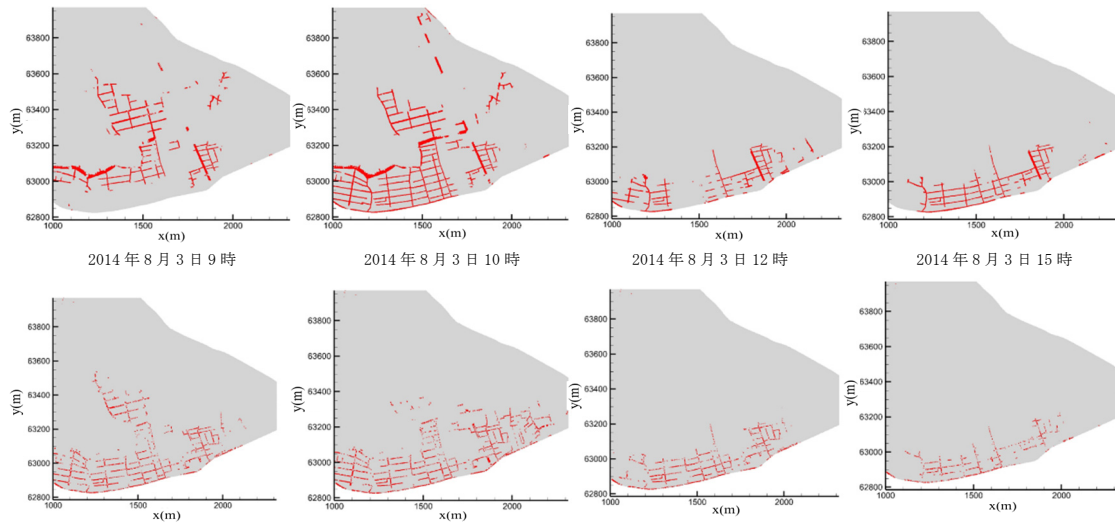


図7内水氾濫の生じた場所（上：従来モデル、下：改良モデル）

（3）豪雨災害の軽減に向けた河川・下水道連携運用および防災行動計画の策定

インフラの老朽化や公共投資の効率化などを背景に、既存防災ストックの有効活用を図ることがますます重要になってきた。研究対象となる紅水川流域においては、降雨に対して、河川と下水道の応答特性が異なることが現地調査により確認できている。また、人工的雨水排除施設として排水路、水門、ポンプ場などが存在している。ポンプ場の稼働については自動であり、ポンプ場内の水位に応じて段階的に数台のポンプが稼働し、水門は平常時においては開放されているが大雨注意報・警報が発令されると閉鎖されるという運用管理方法が採用されている。流域における氾濫リスクは雨の降り方と防災施設の稼働状況の両方に関係があることが明らかであり、防災施設の利活用により豪雨災害の軽減が期待される。本研究では、現地観測データと数値モデル予測情報を最大限に活用し、河川水位ピークと下水道水位ピークのズレを踏まえた排水ポンプの早期放流、放流先河川水位の予測に基づいたポンプ稼働計画、下水道と放流先河川の水位予測を踏まえた排水路水門開閉など防災ストックの利活用方法を提案した。なお、ダムなど洪水調節施設が存在する河川については、ダム放流等との連携運用も考えられる。本研究で開発してきた流れ・氾濫予測数値モデルを用いた河川・下水道流況解析に基づき、内外水氾濫リスクの両方を考慮した様々な施設利活用方法の検討が可能である。

近年頻発する豪雨災害を機に、防災施設などハード対策の限界が広く認識されるようになった。超過外力に伴う災害の発生を前提に、関係者が予め災害状況の想定・共有を行ったうえで、いつ、だれが、何をするのかに着目し、防災行動と実施する主体を時系列順に整理したタイムラインによる減災効果は期待される。現在主流のタイムラインは行政主導であり、住民の能動的防災行動や官民間の緊密な連携が欠ける。その結果、逃げ遅れや空振りが発生し、策定技術の向上が求められている。そこで、住民自らの判断・行動に重点を置き、地域特性や災害リスクの時空間的变化を踏まえたマイタイムライン策定方法を開発した。豪雨災害のトリガーとしては台風の上陸や堤防の決壊・越水は一般的であり、タイムラインにおける災害の発生時刻であるゼロアワーや防災行動に必要な時間であるリードタイムもそれと関係している。このような方法においては、個々住民の地域特性は反映されてなく、空振りや逃げ遅れの要因となる。一方、近年の豪雨災害の実態を踏まえ、行政が発行した洪水・浸水ハザードマップの有効性と重要性が広く認識されるようになった。タイムラインの作成においても、これまでの気象や水位情報等だけでなく、該当地域のハザードマップを生かした災害リスク評価、ゼロアワーとリードタイムの設定や避難経路の選択などによる精度の向上が期待される。また、浸水が発生した場合、氾濫のプロセスに伴い、災害のリスクは時間的・空間的に変化する。これらの変化はリアルタイム観測データと数値シミュレーションを用いた氾濫予測によって定量的に評価することが可能である。このように災害リスクの変化をタイムラインに取り込むことによって、個々住民の避難行動の効率化が期待できる。新たに提案したマイタイムラインの策定方法に基づいて、対象区域のマイタイムラインの試作を検討した。また、平成26年8月に発生した浸水災害をケーススタディとして検討した結果、新たに提案した防災計画は従来の対応方法より効果的であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ji, Y., Zhang, J., Zhang, H., Liu, X.C., Wu, N.C. and Cai, G.T.	4. 巻 41(1)
2. 論文標題 Review on hotspots, challenges, and the future of river management strategies in China	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Biology	6. 最初と最後の頁 13-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22438/jeb/41/1/MRN-1121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 原忠・張浩・坂本淳	4. 巻 105(2)
2. 論文標題 高知県西南地区を襲った平成30年7月豪雨を振り返る	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会誌	6. 最初と最後の頁 68 71
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岡田将治・張浩・田内 敬祐	4. 巻 25
2. 論文標題 高知県安芸市における平成30年7月豪雨時の浸水被害、住民の防災情報活用と避難行動の実態調査	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 127-132
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kawaike, K., Zhang, H., Sawatani, T. and Nakagawa, H.	4. 巻 39
2. 論文標題 Modeling of stormwater drainage/overflow processes considering ditches and their related structures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Natural Disaster Sciences	6. 最初と最後の頁 35 - 48
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Zhang, H., Okada, S., Fujiwara, T. and Kawaike, K.
2. 発表標題 Field investigation of stormwater flows in a sewerage system and receiving stream
3. 学会等名 令和元年度京都大学防災研究所 研究発表講演会, 2020年2月20-21日, 京都大学宇治キャンパス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhang, H.
2. 発表標題 Urban flood simulation considering flow interactions between overland surface and sewer system
3. 学会等名 Second International Scientific Symposium on Water Resources Management and Comprehensive Reclamation of River Basins, November 15-17, 2019, Xi'an, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhang, H. and Ji, Y.
2. 発表標題 Pluvial flood disasters in Kochi Prefecture caused by the 2018 Western Japan heavy rainfall
3. 学会等名 第38回日本自然災害学会学術講演会, 2019年9月21日-22日, 釧路
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張浩・佐々浩司・松田亮・藤原拓・川池健司
2. 発表標題 圧力管渠システムにおけるマンホール内の3次元局所流に関する研究
3. 学会等名 2019年土木学会全国大会第74回年次学術講演会, 令和元年9月3日 5日, 高松
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhang, H., Okada, S., Sassa, K., Fujiwara, T. and Kawaike, K.
2. 発表標題 Integrated management of river and sewer systems for urban flood mitigation
3. 学会等名 International Workshop of Water Disaster Mitigation and Water Environment Regulation (IWWAW-2019), April 24-27, 2019, Chengdu, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhang, H., Bandou, H., Fujiwara, T. and Okada, S.
2. 発表標題 Investigation of drainage pump operation and its influence on the flow in a receiving stream
3. 学会等名 The 13th International Conference on Hydrosience and Engineering, 18-22 June, 2018, Chongqing, China (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zhang, H.
2. 発表標題 The 2018 Western Japan Heavy Rain Disaster
3. 学会等名 Sino-Japan Joint Seminar on Urban Flood Management, December 1, 2018, Beijing, China (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 張浩
2. 発表標題 豪雨災害の軽減に向けた下水道施設の排水能力評価技術の高度化
3. 学会等名 高知から発信する下水道の未来第2回シンポジウム「災害に立ち向かう高知家の下水道」, 平成31年1月29日-30日, 高知大学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhang, H. and Nakagawa, H.
2. 発表標題 Indigenous knowledge for bank erosion and flood management
3. 学会等名 2017 APEC Typhoon Symposium: The Challenges and Opportunities for Typhoon and Flood Forecasting, May 2-4, 2017, National Taiwan University, Taipei (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂東 光, 張 浩, 藤原 拓, 岡田 将治, 松岡 直明
2. 発表標題 雨水排除過程に伴う都市放流先河川の水利特性に関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017. 2017年8月30日-9月1日, 東京
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松田 亮, 張 浩, 藤原 拓, 川池 健司
2. 発表標題 マンホール周辺のエネルギー損失に関する実験的研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017. 2017年8月30日-9月1日, 東京
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山中稔・佐々浩司・橋本学・中川一・川池健司・張浩・森牧人・村田文絵・寺尾徹
2. 発表標題 レーダーネットワークを活用した統合防災システムの構築
3. 学会等名 第54回自然災害科学総合シンポジウム, 2017年9月14日, 京都
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Zhang, H., Okada, S., Sassa, K., Fujiwara, T. and Bando, H.
2. 発表標題 Impacts of drainage discharge on the hydraulics of receiving streams in urban areas
3. 学会等名 The Second International Top-level Forum on Engineering Science and Technology Development Strategy, October 18-20, Nanjing, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Zhang, H., Matsuda, T., Fujiwara, T. and Kawaike, K.
2. 発表標題 Impact of sewer pipe arrangement on hydraulic efficiency of municipal sewerage system
3. 学会等名 The 10th International Conference on Challenges in Environmental Science and Engineering, November 11-15, Kunming, China (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Zhang, H., Matsuda, T., Fujiwara, T., Kawaike, K. and Sassa, K.
2. 発表標題 Laboratory experiments on the three-dimensional flow in a junction manhole
3. 学会等名 平成29年度京都大学防災研究所 研究発表講演会, 2018年2月20-21日, 京都
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤谷拓海・張浩・川池健司・中川一
2. 発表標題 都市域における小規模水理構造物に着目した雨水排水プロセスのモデル化
3. 学会等名 平成29年度京都大学防災研究所 研究発表講演会, 2018年2月20-21日, 京都
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Shu, A., Zhang, H. and Li, C.	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Beijing Normal University Publishing Group	5. 総ページ数 289
3. 書名 Eco-river Dynamics	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----