

令和元年6月10日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04051

研究課題名(和文) ICTによる災害情報の共有を想定したリアルタイム浸水ハザードマッピング

研究課題名(英文) Real-time hazard mapping with local flooding information on Information and Communication Technology

研究代表者

佐山 敬洋 (Sayama, Takahiro)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：70402930

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：集中豪雨による洪水災害が激化・頻発化する中、本研究では既往の技術で確立されていない、「リアルタイムの浸水ハザードマッピング」に関する研究を行った。流域内の多くの場所で浸水が発生するような中小河川の洪水については、降雨から河川流量、洪水氾濫までを一体的に解析するRRIモデルを高度化し、特に多地点で観測される水位情報を同化することにより、非観測地点の河川水位や浸水域の推定精度を向上させた。さらに、主要河川の堤防決壊に伴う氾濫については、現場からの浸水情報と事前に実施する多数のシミュレーション結果を同化することにより、簡単に浸水深分布を推定する技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状の洪水予測では、「いま、どこで、どの程度」浸水しているかを把握する手段が無い。一方、情報技術の発展に伴い、被災地からの水害に関する情報が量・質ともに拡大している。さらに、全国でハザードマップの整備が進み、その基礎となる浸水シミュレーション結果が蓄積されている。本研究の提案技術は、現場からの浸水関連情報(点の情報)と事前に実施されたシミュレーション結果をつなぐ(同化する)ことにより、浸水深の空間分布を推定する。開発技術は特許出願をして、その実用化に向けたシステム開発を進めている。これが実現すれば、リアルタイムで洪水の状況を把握しやすくなり、避難や緊急対応の基礎情報を提供することができる。

研究成果の概要(英文)：While flood disasters caused by torrential rains become more frequent and severe in these days, this research focused on “real-time flood inundation mapping”, which has not been realized with current technology. For cases with flooding at many places along tributaries in a river basin, we improved our rainfall-runoff and flood inundation model. In particular, we developed a method to assimilate the model with water levels observed at multiple points, so that the estimates can improve in terms of river water levels and flood inundation even at no observation sections. Furthermore, for cases with large scale flooding caused by levee breaches, we proposed a new method to assimilate preliminary conducted many flood inundation simulations with local flood inundation information on the real-time basis.

研究分野：水文学・水工学

キーワード：浸水 データ同化 ICT 災害情報 RRI 最適内挿法 ハザードマップ 中小河川

1. 研究開始当初の背景

気候変動の影響が顕在化し、集中豪雨による洪水災害が激化・頻発化している。我が国の中山間地域では過疎・高齢化によりコミュニティが衰退するとともに、市町村合併により自治体の管轄範囲も広がっており、豪雨時の避難誘導がますます困難になっている。

洪水予報の現行制度では、流域面積の大きい主要河川については、河川管理者が水位を予測し、関連自治体に伝達する。一方、中小河川では、観測水位を周知するか、それも難しい上流域では気象予警報等を頼りに自治体は避難誘導する。

緊急対応を行う自治体の視点に立てば、河川の洪水予報に加えて、管轄区域のどこで・どのように浸水被害が発生しているかを迅速に把握することが大切である。現状では、自治体職員や水防団による巡視、住民からの通報等をもとに、災害対策本部が状況把握に努める。一部の自治体では災害情報共有システムを導入し、現場からの情報を一元管理する試みも進んでいる。ただし、浸水関連情報は膨大な点の情報として集まり、その一方で被害が深刻で孤立した被災域からは情報が不足するなど、俯瞰的に浸水状況を把握することは容易ではない。

関連する学術の動向としては、中小河川も含めた流域一体の分布型流出モデリングに関する研究が進んでいる。またXバンドMPレーダの整備や領域気象モデルの発展に伴い、洪水予測の精度向上も期待される。さらに地下構造や下水道も反映する詳細な氾濫解析技術も進歩している。一方で、上述のような中小河川を含む流域スケールで、降雨流出から洪水氾濫までを一体的に解析する技術は発展途上である。また観測流量による流出モデルのデータ同化については、これまでも貯留関数法など集中型モデルにカルマンフィルタを応用する方法が提案され、実用化されている。近では分布型流出モデルのデータ同化について、アンサンブルカルマンフィルタや粒子フィルタを応用した手法が提案されている。ただし、これらの手法は多数のシミュレーションを必要とするものであり、計算時間の問題など、実用化に向けて更なる研究が必要である。さらに、本研究で着目する浸水情報を活用したデータ同化は、開始当初研究が十分に進んでいなかった。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究は、自治体の防災担当者や住民が直感的に浸水域を把握できるように、リアルタイムの浸水ハザードマッピングに関する研究を行った。特に今後ICT(情報通信技術)の防災利用が進み、現場からの浸水関連情報がより効率的・短時間で収集されることを想定し、浸水情報や河川水位情報を逐次シミュレーションに反映させるデータ同化手法を開発することを本研究の目的とした。

具体的には、本研究の目標を達成するために、以下の4つの課題に取り組んだ。

- 1) 国内の中小河川を含む流域に適用できるよう RRI モデルを高度化する。
- 2) 河川水位及び浸水情報による RRI モデルのデータ同化手法を提案する。
- 3) 自治体・河川管理者・消防などの機関が、いつ・どのようにして・どのような浸水情報を収集、伝達しているかを分析する。
- 4) 実流域を対象にして、計算時間、精度、データ同化の効果という三点から、提案技術の実用性を検証する。

3. 研究の方法

本研究で取り組んだ内容は、図1のように整理される。図1の左側はモデル予測を表す。左上は、中小河川を含む流域一体の洪水予測に関連するものであり、①降雨流出と洪水氾濫を流域一体で解析する RRI モデルの高度化に取り組んだ。また、②流域多地点で観測された水位情報をモデルに同化する技術を開発した。これは、図中のモデル予測と現地情報をつなぐ矢印に相当し、本研究では最適内挿法による分布型モデルのデータ同化手法を提案した。一方、③堤防の決壊を伴うような洪水氾濫については、ハザードマップの基礎になる浸水想定区域

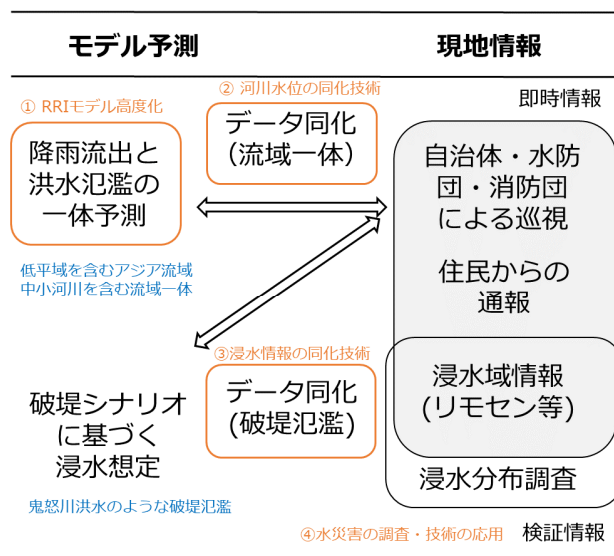


図1 リアルタイム浸水ハザードマッピングの実現に向けた本研究の枠組み

図作成の際に、様々な破堤シナリオに基づく浸水解析が実施されている。本研究では、この計算結果を活用して、氾濫原からの浸水関連情報と同化させることによってリアルタイムの浸水ハザードマッピングを実現する技術を提案した(図中の中心にある斜めの矢印に相当する)。^④ 本研究で取り組む課題は洪水災害に関連する内容であり、本研究の実施期間中にも大規模な水災害が多発した。流出や浸水に着目して災害調査を実施するとともに、上記開発技術の適用と検証、改良を重ねた。特に、本研究では平成27年9月関東・東北豪雨による鬼怒川水害、平成29年7月九州北部豪雨による筑後川支川の水・土砂災害、平成30年7月豪雨(西日本豪雨)による岡山県真備町地区の水害を対象に調査を行い、開発技術の応用研究を進めた。

4. 研究成果

① RRI モデルの高度化と中小河川への適用(発表論文⑤、⑧、⑨)

研究代表者が開発を進めてきた分布型の降雨流出氾濫(RRI)モデルは、研究開発当初の時点では、タイ・チャオプラヤ川流域やパキスタン・インダス川流域など、国外の大流域を対象にした流出氾濫一体解析の応用が中心であった。一方、国内の中小河川で詳細な解析を行うためには、地形情報や河道断面を正確に反映することが重要であった。本研究では、まず兵庫県千種川流域(730 km²)を対象に、国土地理院による地形データと1,632箇所の断面データを反映させた詳細なモデルを構築し、中小河川の水位や氾濫の再現性を検証した(発表論文⑨)。

その他、RRIモデルの高度化について、研究開発当初は右岸と左岸を分離せずに取り扱っていたのに対し、特定の河川については、兩岸を分離して計算できるようにモデルを改良した。これにより、破堤の効果などをモデル上で反映しやすくなった(発表論文⑤)。さらに、ダムの操作規則を詳細に反映するようモデルを改良した(発表論文⑧)。

RRIモデルは国立研究開発法人土木研究所のホームページより公開し、国内外の研究者や実務者が入手して、その応用が進んでいる。特に、本研究期間中の4年間は、国内の中小河川において非観測地点の流量推定が可能であるという認識が広まり、水災害の現象把握や土砂動態の解析などにRRIモデルの出力が応用された。

② RRIモデルの多地点水位データ同化(発表論文①、⑦)

上述の通り、本研究では、流域内の多地点で観測された水位情報を分布型モデルに同化して、観測情報の無い区間も含めた水位の予測精度向上を目指した。これまで提案された流出モデルのデータ同化は、1)モデルを線形化したうえでカルマンフィルタ等を適用する方法と、モデル構造を変えずにアンサンブルカルマンフィルタや粒子フィルタなど多数の計算を実行する方法とに大別される。1)は貯留関数法など集中型モデルのデータ同化に多くの応用実績がある。ただし、複雑な構成を有する分布型モデルを対象とした場合、線形化するためにモデル構造が制約される。一方、2)の方法はモデル構造を変更する必要がない利点がある。しかし、詳細な分布型モデルをリアルタイムで多数実行するためには計算負荷が大きくなる。そこで、本研究は、アンサンブル計算を必要とせず、カルマンフィルタと同じ観測更新式を用いる最適内挿法を分布型モデルのデータ同化に適用した。最適内挿法は、誤差の共分散行列を時間的に固定することにより、カルマンフィルタやアンサンブルカルマンフィルタに必要な共分散行列の時間更新を実施しない。ここでは、事前に実施する流出計算結果から同行列を推定して、流域内の複数地点で観測された水位をもとに、非観測区間を含む河川水位を更新する。具体的には、過去の多数の出水イベントでモデルの誤差構造(分散や空間相関)を定量化し、データ同化に反映させる。

本研究の対象流域は兵庫県の千種川流域とした。本研究の同化の対象変数は、任意の断面を設定した4,116箇所の河道水位とした。千種川流域では11箇所で水位が観測されており、観測ベクトルの次元は11となる。つまり11箇所の水位観測情報から、非観測地点を含む4,116箇所の河川水位の推定結果を補正する。

全てのイベントを対象にした交差検討の結果を図2に示す。同図を作成するにあたり、全観測地点において推定されたスライド補正(観測地点における局所的なバイアスの補正)及び同化前後の水位と観測水位とを比較して平均二乗誤差(RMSE)を計算する。7イベント×11観測地点の結果があるため、各条件で計77のRMSEが計算される。この結果から、本事例ではスライド補正によって全地点・全イベントでRMSEが1m以下に減少して、その中央値が0.26mとなり、交差検証による同化の結果、

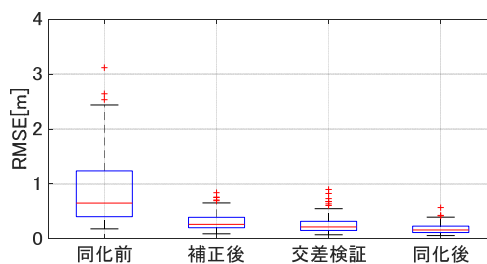


図2 交差検証によるデータ同化の精度評価

その中央値は 0.21 m となることが分かった。さらに当該地点の観測値を用いて同化した場合、すなわち交差検証ではなく全地点を用いた同化では、誤差がさらに小さくなり RMSE の中央値は 0.16 m になった。以上のように、交差検証の結果から、データ同化を行う前に計算水位と観測水位のバイアスを除去しておくことが同化の効果を高めること、それにより非観測区間でもオフライン同化によって水位の推定精度が向上することが分かった。また本報では結果を示していないが、別途行った双子実験の結果から、初期値を逐次更新するオンライン同化の方が、オフライン同化に比べてより同化の効果が高いことを示した。

本研究で示した方法は、分布型流出モデルのデータ同化手法の一つとして簡易かつ実用的なものであり、特に非観測地点の水位を補正する手法として有効であると考えている。

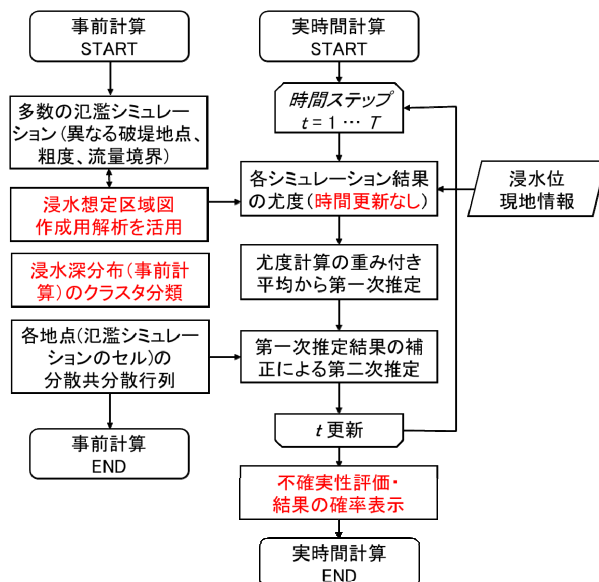


図3 現地情報を用いた浸水深分布の推定手法

③ 現地情報を用いた浸水深分布の推定 (発表論文④、⑥)

堤防決壊や越流による洪水氾濫が発生した際には、災害対策本部に多数の被災情報が寄せられ、その中には、現地の浸水状況を推定し得る情報も含まれる。さらに災害情報を一元化するシステムの整備も進み、災害対策本部と被災現場との間で双方向の情報共有が可能になっている。本研究では、こうした定性的な点の情報から、浸水深分布の空間情報に変換する技術を開発した。発表論文④では仮想的な適用事例を、次報⑥では平成 27 年 9 月鬼怒川水害を対象にした適用結果を、さらに現在投稿中の論文において、より実務に応用しやすいように手法を改良し、平成 30 年 7 月豪雨小田川水害でその効果を検証した。

提案手法は、事前計算と実時間計算の二つの手続きで構成される。事前計算では破堤地点や流入境界条件を変えた多数の氾濫計算を実施する。同手法は、事前計算と実時間計算の二種類で構成される(図3)。実時間計算はベイズ推定に根拠をもつ第一次推定と最適内挿法に根拠をもつ第二次推定の二段階がある。

事前計算は、氾濫モデルを用いて様々な条件で計算を行う。本研究では浸水想定区域図作成用の実施された解析結果を事前計算として採用できることを示した。事前計算の結果は、第一次推定の元となるほか、第二次推定で必要となる分散共分散行列を推定するために用いられる。

図4にシミュレーションによる仮想真値の浸水分布と、現場8地点で浸水情報が得られた場合の浸水深分布の推定結果を示す。紙面の都合上、結果の解説は省略するが、8地点の観測地点でも浸水深の空間分布を概ね再現できること、また湛水量を3%程度の誤差で推定できることを明らかにした。提案した手法は、既に多くの河川で実施されている浸水想定区域図作成用のデータを事前計算に活用する。複数地点で得られる離散的な浸水深の情報を入力すれば、直ちに浸水深分布が推定できる仕組みであり、破堤氾濫時のリアルタイム浸水マッピングや災害直後の浸水深分布・湛水量推定に有効な手法であると考えている。同手法は、本研究期間中に特許出願を行い、現在、民間企業とも連携をしてシステム開発に取り組んでいる。

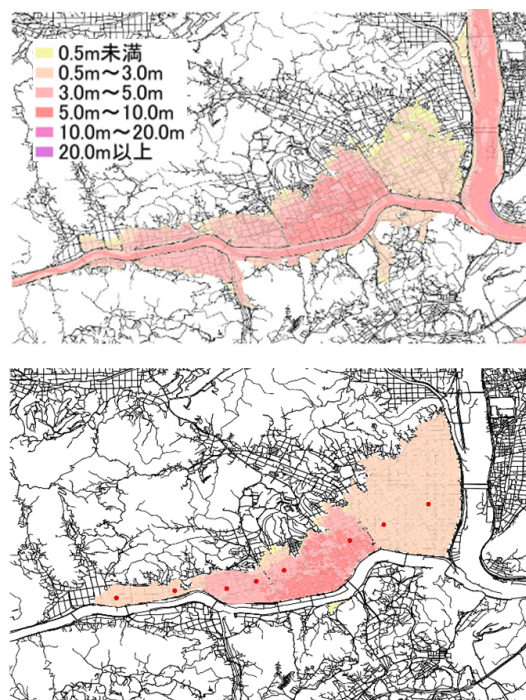


図4 平成30年7月豪雨による小田川水害の浸水域：仮想真値と第二次推定の浸水深分布 (下図の赤点は現地情報の入力地点)

④ 水災害の現地調査と開発技術の適用・検証（発表論文②、③、⑩、⑪）

本研究対象期間中に発生した水災害を対象に、浸水関連情報の現地調査や開発技術の適用・検証を進めた。以下、実施内容と成果を概説する。

・平成 27 年関東・東北豪雨による鬼怒川水害については、発表論文②で浸水関連の情報がソーシャルメディアから抽出できる可能性があること、発表論文⑪で示した浸水深分布と対応していることを明らかにした。また発表論文⑩では鬼怒川水害の降雨流出特性について RRI モデルを用いて分析を行い、大規模出水時の定常状態と流出機構について考察した。

・平成 29 年九州北部豪雨による筑後川支川の水害については、発表論文③でバックパック型のモービルマッピングシステム(MMS)を用いた浸水深や堆積土砂量の推定を行うとともに、RRI モデルを用いた中小河川沿いの浸水現象を再現し、現地観測と良好な対応を示す事を明らかにした。ただし、九州北部豪雨災害では多数の表面崩壊によって河道に土砂が堆積し、その傾向を再現することが氾濫現象を再現するうえでも重要であることが確認された。

・平成 30 年 7 月豪雨では、中小河川を含めて広域の流出現象を RRI モデルで再現した。またアンサンブル降雨を入力して、その予測可能性について検討した。浸水深分布のための現地情報データ同化については、上述の通り、岡山県真備町の水害を対象に検証を進めた（投稿中）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 11 件）

- ① 佐山敬洋、三宅慎太郎、寶 馨：分布型流出モデルの誤差構造分析と多地点水位データ同化手法、河川技術論文集、第 25 巻、2019.（印刷中）
- ② Yongxue Shi, Takahiro Sayama、Kaoru Takara、Kiyonori Ohtake: Detecting flood inundation information through Twitter: The 2015 Kinu River flood disaster in Japan, Journal of Natural Disaster Science, (in Print).
- ③ Takahiro Sayama、Koji Matsumoto、Yuji Kuwano、Kaoru Takara: Application of Backpack-Mounted Mobile Mapping System and Rainfall-Runoff-Inundation Model for Flash Flood Analysis, Water, 11(5): 963, 2019.
- ④ 佐山敬洋、小林亮祐、寶 馨：現地情報の同化による浸水深分布の推定 -平成 27 年 9 月鬼怒川洪水を対象にした検証-、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 74, No. 5, I_1507-I_1512, 2018.
- ⑤ 近者敦彦、林 忠灯、山中威士、阿部紫織、岩崎貴志、崔 国慶、中村要介、佐山敬洋：降雨流出氾濫一体解析におけるグリッドセルベースの河道の取り扱い、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 74, No. 5, I_1519-1524, 2018.
- ⑥ 佐山敬洋、寶 馨：リアルタイム浸水ハザードマッピングのための現地浸水情報同化技術、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 74, No. 4, I_1297-I_1307, 2018.
- ⑦ 三宅慎太郎、佐山敬洋、寶 馨：最適内挿法による分布型水文モデルの河川水位データ同化法、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 74, No. 4, I_1009-I_1014, 2018.
- ⑧ 近者敦彦、中村要介、阿部紫織、佐山敬洋、若月泰孝：平成 27 年 9 月関東、東北豪雨における鬼怒川上流ダムによる洪水調節効果の分析、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 74, No. 4, I_1507-I_1512, 2018.
- ⑨ 山本浩大、佐山敬洋、近者敦彦、中村要介、三宅慎太郎、寶 馨：千種川流域を対象にした RRI モデルによる降雨流出・洪水氾濫統合型解析、自然災害科学、36, pp. 139-151, 2017.
- ⑩ 佐山敬洋、田中茂信、寶 馨：分布型流出モデルと時空間起源追跡法による鬼怒川洪水の流出解析、水文水資源学会誌、第 30 巻、第 3 号、pp. 161-172, 2017.
- ⑪ 佐山敬洋、寶 馨：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨に伴う鬼怒川氾濫の浸水深分布推定、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 72, No. 4, I_1171-I_1176, 2016.

〔学会発表〕（計 13 件）

- ① 佐山敬洋、三宅慎太郎、山本浩大、近者敦彦、寶 馨：中小河川を含む分布型洪水予測と水位データの同化に関する研究、水文・水資源学会総会・研究発表会、三重大学、2018.
- ② Takahiro Sayama、Kenichiro Kobayashi、Yasuto Tachikawa: Flood Hazard Mapping and Recent Flood Disasters in Japan, Catalogue of Hydrologic Analysis (CHA) Workshop on Hazard Mapping, IHP-RSC, Shanghai, China, 2018.
- ③ 佐山敬洋：温暖化適応策のための洪水ハザードモデリング、水工学委員会主催研究討論会：「極端災害事例から学ぶ気候変動適応の課題」、土木学会全国大会、北海道大学、2018.
- ④ 佐山敬洋、松本紘治、寶 馨：平成 29 年 7 月九州北部豪雨を対象とした中小河川の降雨流出氾濫解析、招待講演、日本気象学会 2018 年度春期大会、2018.

- ⑤ Takahiro Sayama, Kaoru Takara : Hydrologic Sciences for Flood Disaster Mitigations: Integration of Local Information and Flood Modeling, Hydrology Delivers Earth System Sciences to Society 4 (HESS4), May 16-19, IIS University of Tokyo, 2017.
- ⑥ Takahiro Sayama and Kaoru Takara : Integration of Local Information and Flood Modeling for Real-Time Flood Hazard Mapping, 5th International Symposium on Earth-Science Challenges (ISEC5), October 1-5, Uji Campus, Kyoto University, 2017.
- ⑦ Takahiro Sayama : Challenges in Flood Predictions - Lessons learnt from recent disasters in Japan -, AGU-JpGU Great Debate, Geoscience and Society, Union Session, AGU Fall Meeting, New Orleans, 2017.
- ⑧ 佐山敬洋: RRI モデル講義、水文水資源学会主催『RRI モデルアクティブセミナー』、中央大学後楽園キャンパス、2017.
- ⑨ Takahiro Sayama, Yongxue Shi, Kaoru Takara : Data Assimilation of Citizen Collected Information for Real-time Flood Hazard Mapping, AGU Fall Meeting, H53N-06, New Orleans, 2017.
- ⑩ 佐山敬洋・田中茂信・寶馨 : 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨を対象にした鬼怒川上流域の洪水流出解析、水文・水資源学会、コラッセふくしま、2016.
- ⑪ 佐山敬洋・小林亮祐・寶馨 : 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による常総市周辺の浸水深分布推定、日本自然災害学会、静岡県地震防災センター、2016.
- ⑫ 佐山敬洋 : 鬼怒川氾濫による常総市周辺の浸水被害に関する研究・調査報告、河川技術に関するシンポジウム、OS1「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害」、東京大学、2016.
- ⑬ Takahiro Sayama and Kaoru Takara : Values of flood hazard mapping for disaster risk assessment and communication, AGU Fall Meeting, San Francisco, December 14, 2015.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：リアルタイム浸水ハザードマッピングのための現地情報同化方法及び装置

発明者：佐山敬洋

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2016-245158 号 (PCT/JP2017/044954)

出願年：2016 年 (2017 年)

国内外の別：国内 (国際)

[その他]

ホームページ等

RRI モデル公開サイト：http://www.icharm.pwri.go.jp/research/rri/index_j.html

平成 27 年関東・東北豪雨 鬼怒川氾濫による常総市周辺の浸水深分布調査(第二報)：

<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/news/6105/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：畑山 満則

ローマ字氏名：HATAYAMA、Michinori

所属研究機関名：京都大学

部局名：防災研究所

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：10346059

研究分担者氏名：寶馨

ローマ字氏名：TAKARA、Kaoru

所属研究機関名：京都大学

部局名：総合生存学館

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：80144327

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。