

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月10日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究（B）

研究期間：平成22年度～平成23年度

課題番号：22760379

研究課題名（和文）全球水文モデルのネスティングによる洪水流出氾濫一体シミュレーション

研究課題名（英文）Rainfall-Runoff-Inundation Simulation Based on Global Hydrologic Model

Nesting

研究代表者

佐山敬洋（SAYAMA TAKAHIRO）

土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター・研究員

政策研究大学院大学・連携准教授

研究者番号：70402930

研究成果の概要（和文）：地球上の任意の流域で河川流量と洪水氾濫とを一体的かつ簡易に予測する技術を開発した。開発モデルは降雨流出氾濫モデル(RRI Model)と呼び、研究期間中に世界の大規模洪水を対象にして多くの実証研究を行った。とくに2011年タイ・チャオプラヤ川洪水においては、洪水がピークを向かえる以前から緊急対応のシミュレーションを実施し、下流部の洪水が長期化するという予測結果を公表した。洪水収束後の現地調査の結果、概ね予測結果が妥当であったこと、蒸発散等の影響を考慮することでさらに河川流量や浸水深の計算精度が向上することが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：This study developed a new model to predict river discharge and flood inundation simultaneously and simply for any river basin in the world. The model is named Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model, which has been applied to a various flooding in the world during this study period. Particularly, for the devastating 2011 Chao Phraya flooding in Thailand, an emergency response-type flood prediction conducted in mid-October 2011 indicated that the large-scale inundation in the lower part of the basin might remain even until the end of November. The post flood analysis with field investigations verified that the above prediction was more or less reasonable, and updating various input information including evapotranspiration showed significant improvement in terms of simulating more accurate river discharges and inundation depths.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
H22年度	1,800,000	540,000	2,340,000
H23年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：洪水災害、水文モデル、降雨流出、洪水氾濫、チャオプラヤ川、インダス川

## 1. 研究開始当初の背景

これまでの洪水予測は、山地に降った降雨が河川に到達するまでの降雨流出過程と、河川が溢れて平野部に広がる氾濫過程とを分けて解析することが一般的であった。我が国のように、流域の大部分が山地で占められており、下流部の河川沿いには連続堤防が整備されている場合には、そのような手法で特段問題はない。それに対して、世界の大規模洪水を対象とする場合には、流域内で広域の氾濫が広がるが多いため、降雨流出と洪水氾濫とを分けて取り扱うことが難しく、両者を一体的に解析する技術の開発が必要となる。

## 2. 研究の目的

大規模洪水災害の際には、被災国はもとより、国外の関係機関や企業においても、限られた情報をもとに被害の全容を把握し、的確かつ迅速な対応行動が求められる。大規模洪水の浸水範囲を特定するうえでは、衛星による洪水モニタリングが有効であり、UNOSATなどは洪水発生直後から人工衛星による浸水想定域を発信している。ただし衛星による洪水モニタリングにも撮影頻度や空間解像度などの問題もあり、浸水域の拡大傾向を時系列で把握したり、被害に直接関係する浸水深を推定したりすることは難しい。そこで、衛星による洪水モニタリングを補完する手段として、水文モデルの応用に着目し、全球任意の地域で迅速に水文モデルを展開して、河川流量から洪水氾濫域までを一体的に予測するモデル(RRI Model : Rainfall-Runoff-Inundation Model)を開発する。

降雨流出と洪水氾濫とを一体的に解析することによって、従来の分布型流出モデルでは再現の難しかった低平流域での河川流量予測の精度向上も期待できる。これまでの分布型降雨流出モデルでは、地形の情報をもとに流れの方向をあらかじめ規定し、降雨から流出を予測してきた。しかし、低平地が広がる流域においては、流れの方向を地形によって定めることが難しく、また、洪水氾濫の影響が河川流量にも大きく影響しているため、河川流量の再現性にも問題があった。流れの方向と流量が各地点の水位勾配によって変化するモデリングを流域全体に展開することで、浸水の影響を考慮に入れた河川流量の推定も可能となる。

## 3. 研究の方法

開発した RRI モデルの構成を図 1 に示す。まず対象とする流域全体を斜面部と河道部とに分けて取り扱う。河道のあるグリッドセ

ルにおいては、一つのグリッドセルに河道と斜面の両方が存在する。河道はグリッドセルの中央を流れる線分として表現し、上下流における接続関係と幅・深さ・堤防高の情報を保持。降雨は斜面部にのみ入力し、斜面部・河道部でそれぞれ水の挙動を追跡した後に、設定した時間刻みで斜面部と河道部との水のやり取りを計算する。RRI モデルの特徴は以下のように3点にまとめられる。

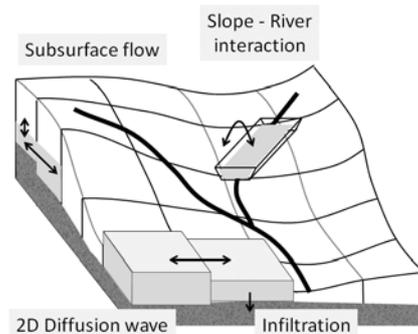


図1 RRIモデルの構成

- (1) 二次元の拡散波近似解析：氾濫原の浸水拡大過程や低平地を含めた降雨流出過程を適切に計算するため平面二次元の解析を行う。拡散波近似した浅水方程式により、各グリッドセルにおける流出方向とその流速を周囲グリッドセルの水位によって算定する。
- (2) 側方地中流、鉛直浸透流の反映：流域からの流出量を計算するうえで、地中の水の流れを再現することが大切である。地中の水の流れは、斜面流下方向の側方地中流が卓越する場合と、鉛直方向の浸透流が卓越する場合がある。RRIモデルでは、側方地中流について、我が国の山地流域で多くの適用実績がある中間流・表面流を反映する流量流積関係式を用いる。また、鉛直浸透流については、土質に応じたパラメータ範囲が推定されているGreen Amptモデルを用いる。
- (3) 河道と斜面のインタラクション：流出と氾濫とを一体的に解析するためには、河道と斜面との水のやり取りを適切に再現する必要がある。RRIモデルの河道グリッドセルでは、上下流の水位差によって、拡散波近似に基づき流量と水位を計算する。さらに、河道と斜面の水位差および堤防高に基づいて、両者間の水の流出入を計算する。河道は長方形断面を仮定して、河道幅・深さ・堤防高をパラメータとして形状を規定する。

## 4. 研究成果

### (1) 2010年インダス川洪水への適用

2010年7月から8月にかけてパキスタンで大規模な洪水災害が発生した。この洪水では、

まずインダス川上流域に位置するカブール川流域を中心にフラッシュフラッドが発生し、1000名以上の死者をもたらす未曾有の災害となった。さらに、モンスーンの影響によって8月中もパキスタン南部で降雨が継続し、インダス川本川沿いで広域の洪水氾濫が発生した。

カブール川流域(92,605 km<sup>2</sup>)においては、衛星リモートセンシングによって特定の難しいフラッシュフラッドの被害域をどの程度特定できるか、また、インダス川全流域(計算領域:930,000 km<sup>2</sup>)においては本川から約100 kmも離れて広がった広域の氾濫水の挙動をどの程度再現できるかに着目して分析を行った。

モデルの入力となる地形データセットは30 sec (約761×924 m)の空間分解能を持つSRTM 全球地形データセットとした。また、河道セルを特定するために、HydroSHEDSによる落水方向・集水面積データセットを用いた。河道の幅と深さは、衛星リモートセンシングや現地の写真より集水面積の関数として定式化した。降雨は衛星観測雨量 GSMaP と地上雨量とを合成したものを用い、計算対象期間は7月27日から8月2日とした。

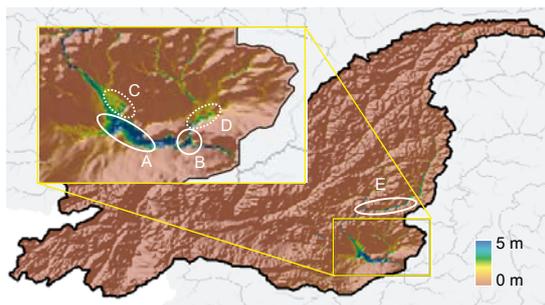


図2 カブール川流域の計算最大浸水深

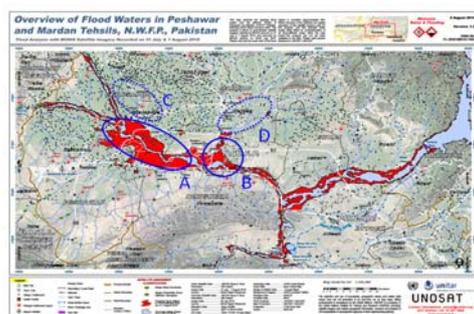


図3 カブール川下流域の衛星による浸水想定域

図2はカブール川全流域で計算した際の斜面部の最大浸水深を示している。とくに洪水被害の大きかったペシャワール盆地周辺に着目すると、領域AおよびBのカブール川本川沿いでは、MODIS による浸水推定域(図3)と計算によって推定された浸水域とが概ね一致していた。一方、エリアCやDは同モデ

ルでは浸水の可能性を示唆しているのに対し、MODIS の分析では浸水域と判別されていない。これは、MODIS の撮影日が8月1日であり、降雨のピークから数日遅れていたことにも起因している。図4は建物被害調査の結果を示しており、エリアCやエリアDのカブール川支川沿いにおいて大きな洪水被害が出ていることが分かった。

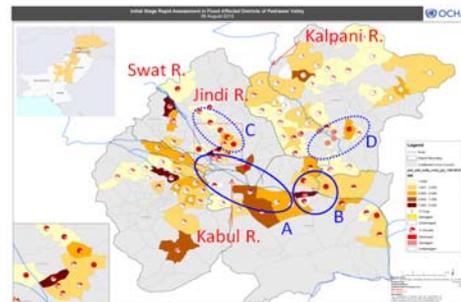


図4 カブール川下流域の家屋被害分布

カブール川流域に適用した RRI モデルをインダス川全流域に展開する。モデルのグリッドサイズは60 sec に低分解能化した。計算期間は2010年7月20日から9月20日までの60日間とした。計算プログラムの並列化により、全流域の流出氾濫計算を約1.5日程度で実行できる。図5の結果は、計算期間中の最大浸水深の分布を示している。同図に示した衛星観測による浸水想定域からも分かるように、右下図の中央部に位置するサッカル堰上流の右岸側から約100km程度西側に離れたところにまで氾濫水が広がっている。RRI モデルはこうした大規模氾濫現象をよく再現している。

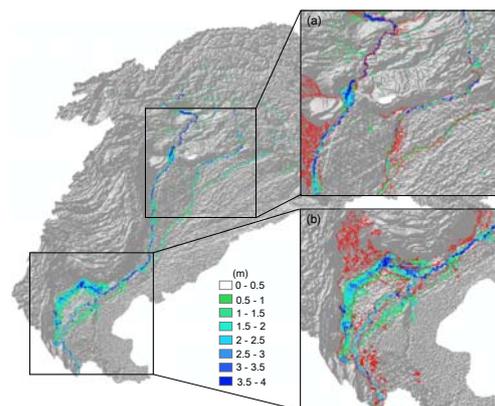


図4 インダス川全流域を対象とした RRI 計算結果 (図中の赤線は衛星リモートセンシングによる浸水想定)

インダス川本川に沿って観測された流量を計算結果と比較する(図5)。1次元のキネマティックウェーブモデルを用いて計算した場合にはピーク流量を過大に評価し、かつピークの生起時刻が早くなりすぎるのに対し、2次元の拡散波近似を用いることによ

て、氾濫を考慮しながら計算するため、河川流量の再現性も向上することが分かる。

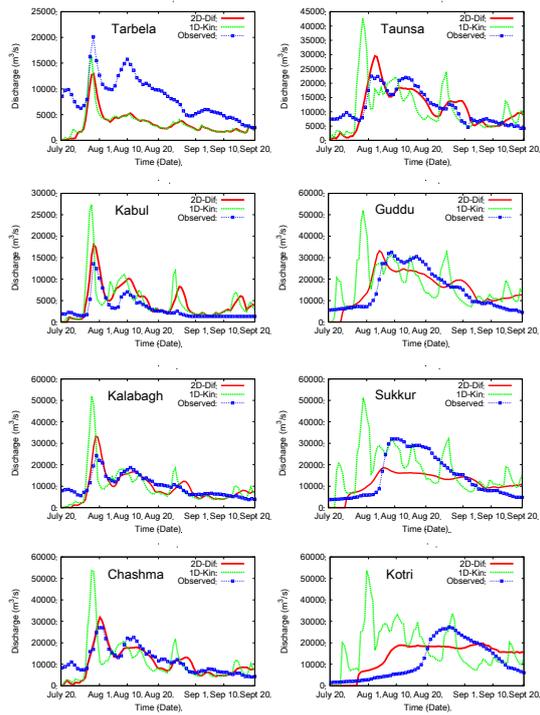


図5 インダス川沿いの複数地点における河川流量 (2D-Dif は 2次元拡散波近似による計算、1D-Kin は 1次元キネマティックウェーブによる計算)

(2) 2011年チャオプラヤ川洪水への適用

2011年タイ洪水を対象に、RRI Model を用いた緊急対応の洪水予測を実施した。洪水がピークを迎える10月中旬に予測した結果は、11月下旬まで下流域の洪水氾濫が残る可能性を示唆していた。その後、現地情報を収集しながら再現計算を行い、この予測がどの程度正しかったのかを検証した(図6)。また、衛星情報をベースにした入力から現地情報をベースにした入力に更新した際にどの程度計算精度が向上するかを分析し、広域の降雨流出氾濫計算で優先的に入手・反映すべき情報について考察した。

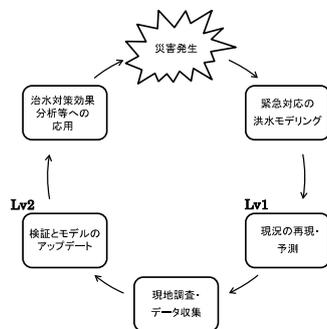


図6 緊急対応の洪水予測と検証サイクル

緊急対応の洪水計算 (Lv1) においては、降

水情報として 3B42RT と呼ばれる衛星降雨プロダクトを用いた。また8日先までの予測雨量は気象庁による全球数値予報モデル (JMA-GSM) の結果を用いた。さらにその先の入力降雨については、乾季で予測雨量の影響が比較的小さいと考え2010年の実績降雨を用いた。河道の幅と深さについては、流域内で121地点の河道断面情報を入手し、集水面積と河道幅・深さの関係を定式化することによって設定した。

10月14日の時点で得られた浸水深の計算結果 (Lv1) と衛星情報による浸水想定域の比較を図7に示す。この比較からナコンワン上流やアユタヤ周辺の氾濫域を概ね捉えられていることを確認したうえで、上述の情報を入力して11月下旬までの予測を行った。その結果、アユタヤ周辺では11月下旬でも広域浸水の残る可能性が示唆された。

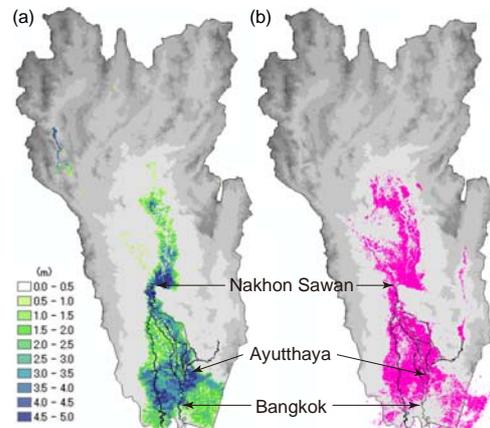


図7 Lv1の計算浸水深と衛星による浸水想定域 (10月14日時点の第1報結果)

その後10月下旬から現地の情報を逐次入手して計算結果の更新を続けた。具体的には、地上雨量による衛星雨量の補正、蒸発散の考慮、ダムモデルの追加、潮位境界条件の設定、パラメータの調整、河道断面のより詳細な反映を行った。全ての項目について更新したうえで洪水収束後に実施した再現計算をLv2とよび、以下でLv1、観測情報と比較する。

① 河川流量

流域内の主要地点における計算および観測の流量と水位のハイドログラフを図8に示す。ナコンサワン地点の9月、10月の平均流量をLv1は約40%、水位を約2m過大評価していた。他の地点においても同様の過大評価傾向がみられた。一方、Lv2の結果は流域全体で流量・水位ともに過大評価傾向が改善された。上流支川のヨム川に位置するY4地点では流量が2か月間概ね一定になっており、これは上流および周辺の氾濫の影響によるものであった。

② 浸水域のピーク水位

RRIモデルが示すピーク浸水位の妥当性を

検証するため高性能 GPS を用いた浸水痕跡調査(主としてアユタヤ・ナコンサワン間を対象)を実施した。各地点のピーク浸水位を比較した結果を図 9 に示す。Lv1 の結果は氾濫原で 2.5 m、河川沿いで 0.8 m の過大評価であるのに対し、Lv2 では氾濫原で 1.1 m、河川沿いで-0.5 m となり、Lv1 よりも精度が上がっている。

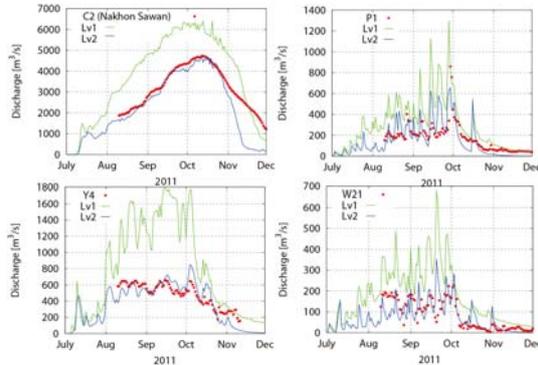


図 8 チャオブラヤ川主要地点の計算・観測流量

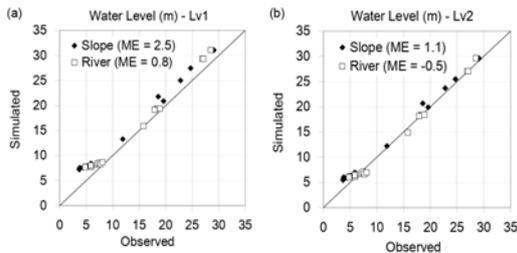


図 9 チャオブラヤ川主要地点の計算・観測流量

### ③ 浸水域の空間分布

衛星画像による浸水想定域とモデルによる浸水深を 9, 10, 11 月の中旬時点で比較する(図 10)。11 月下旬までアユタヤ周辺で洪水が残る可能性があるという予測結果は概ね間違っていないと考えられる。その一方で、Lv1、Lv2 ともに氾濫域を過小に評価していたことが分かる。この原因は、平野部で鉛直浸透した水を河川に戻していないというモデル構造上の問題による。加えて洪水逡減時の氾濫挙動の複雑さにも起因すると考えられる。上述の GPS 計測を 11 月下旬に実施した結果、ピーク時点の水位は河川と氾濫域で概ね一致していたことを確認した。一方、計測実施の 11 月下旬には、とくに中流部において河川の水は既に 4 m ピークから低下しているのに対し、氾濫域の低下量は 2 m 程度であった。水位が低下するに従って水田の境界や道路などの人口構造物および微地形による影響が相対的に大きくなり、氾濫域と河川の水が分離される。RRI モデルはそうした挙動を正しく反映しきれないため、河川の水は低下と合わせて氾濫域の水位も比較的早い段階で低下させてしまう。

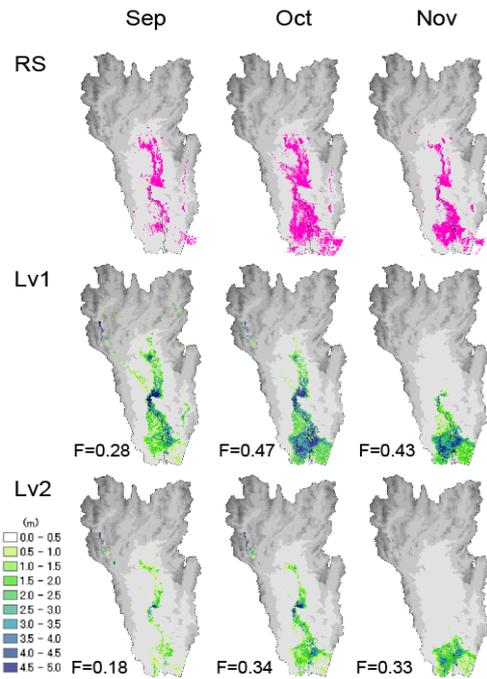


図 10 計算浸水深と衛星による浸水想定域

(Lv1 の Nov. の結果は 10 月 14 日時点での予測結果)

### ④ 入力情報の優先度について

Lv2 で更新した入力情報の効果を項目毎に分析した(図 11)。その結果、蒸発散(E)の影響を無視したことがLv1で過大評価をした主たる原因であることが分かった。次に大きな影響を及ぼすのは、下流部においてはダム(D)の考慮であり、上流部においては河道断面(C)の詳細な反映であった。河道断面を正しく反映させることによって、氾濫しながら洪水が流下する過程をより妥当に再現できる。地上雨量で補正した効果(R)の影響は今回については限定的であった。またパラメータ(P)は、Lv1で設定した値が結果的に概ね妥当であったと考えられ、更新の影響も小さくなった。

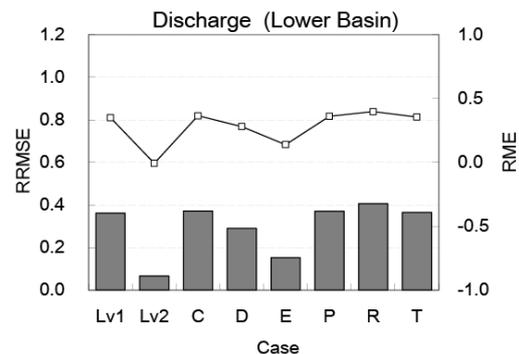


図 11 入力情報の更新が河川流量に及ぼす影響

### (3) まとめ

モデル開発は順調に進み、実施期間中に数

多くの実証研究を行うことができた。タイ・チャオプラヤ川流域の洪水においては、緊急対応のシミュレーションを実施し、その予測結果はアニメーションとともに各種報道機関でも取り上げられた。その後、数値計算と現地調査に基づいてタイ洪水の広域氾濫現象に関する分析を行った。この知見と RRI モデルは、JICA がタイ政府と共同で進めている治水対策の効果分析にも応用された。

当初の研究計画では、平面二次元の流出氾濫モデルを大陸河川の流域に適用することは難しいと考え、より大きなグリッドサイズで別途計算した流量の情報を境界条件にして、特定の領域内だけをネスティングすることを想定していた。開発した RRI モデルは、そのような境界条件を受け取ることができるため、上記の目的を達成する領域モデルとしても利用できる。ただしモデルの計算効率化を図ることができたので、インダス川全流域においても二次元計算が可能となり、この簡便さがチャオプラヤ川洪水時のような緊急対応シミュレーションを可能にした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 佐山敬洋・藤岡 奨・牛山朋来・建部祐哉・深見和彦, インダス川全流域を対象とした 2010 年パキスタン洪水の降雨流出氾濫解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 68, No. 4, I\_493-I\_498, 2012.  
<http://jglobal.jst.go.jp/public/20090422/201202298931810720>
- ② Takahiro Sayama, Go Ozawa, Takahiro Kawakami, Seishi Nabesaka, Kazuhiko Fukami, Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrological Sciences Journal, 57(2), DOI:10.1080/02626667.2011.644245, pp. 298-312, 2012.
- ③ 佐山敬洋・Nay Myo Lin・深見和彦・田中茂信・竹内邦良: 降雨流出氾濫モデルによるサイクロナルギス高潮氾濫シミュレーション, 水工学論文集, 第 55 巻, S529-534, 2011.  
<http://jglobal.jst.go.jp/public/20090422/201102261294543609>

[学会発表] (計 1 2 件)

- ① Takahiro Sayama, Susumu Fujioka, Tomoki Ushiyama, Yuuya Tatebe,

Kazuhiko Fukami, Large Scale Rainfall-Runoff-Inundation Analysis in the Indus River Basin, 5th International Conference on Flood Management (ICFM5), Tokyo, 2011.9.28.

- ② Takahiro Sayama, Kazuhiko Fukami, Shigenobu Tanaka and Kuniyoshi Takeuchi, Analysis of Hazard and Damage of Pakistan Flood 2010 with Rainfall-Runoff-Inundation Model, IUGG General Assembly (IAHS), Melbourne, Australia, 2011.7.4.
- ③ Takahiro Sayama, Rainfall-Runoff-Inundation Analysis for Flood Risk Assessment at the Regional Scale, 5<sup>th</sup> Conference of Asian Pacific Hydrology and Water Resources (APHW), Hanoi, Viet Nam, 2010.11.9.

[図書] (計 0 件)

[その他]

- ① 報道発表: タイにおける洪水の状況について、国土交通省河川計画課、土木研究所 ICHARM,  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03\\_hh\\_000417.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000417.html)
- ② ホームページ: タイ・チャオプラヤ川の洪水について、  
[http://www.icharm.pwri.go.jp/news/news\\_j/111024\\_thai\\_flood\\_j.html](http://www.icharm.pwri.go.jp/news/news_j/111024_thai_flood_j.html)
- ③ 報道: チャオプラヤ川流域の氾濫予測結果(NHKをはじめとする 11 のマスメディアで紹介)。
- ④ 佐山敬洋: 世界の大規模洪水を監視・予測する先端技術, 河川文化を語る会「アジア太平洋地域の災害を語る」, 日本河川協会, 愛媛大学南加記念ホール, 2012. 3. 9.
- ⑤ 佐山敬洋: タイ・チャオプラヤ川流域における 2011 年大規模洪水の実態, セッション: 激甚化する降雨災害にどう向き合うか, 土木学会主催東日本大震災シンポジウム, 東京大学, 2012. 3. 6.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐山敬洋 (SAYAMA TAKAHIRO)  
土木研究所 水災害・リスクマネジメント  
国際センター・研究員  
政策研究大学院大学・連携准教授  
研究者番号: 70402930

(2) 研究分担者: なし

(3) 連携研究者: なし