

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：82114

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560633

研究課題名(和文) 世界の大規模洪水を対象とした降雨流出氾濫現象の解明と予測に関する研究

研究課題名(英文) Understanding and prediction of rainfall-runoff-inundation processes for large scale floodings in the world

研究代表者

佐山 敬洋 (SAYAMA, Takahiro)

独立行政法人土木研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70402930

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、世界各地で発生する大規模洪水を対象に、洪水の現象を明らかにして、予測精度を向上させることを目的とした。本研究の結果、(1)地下水や蒸発散の影響も考慮して降雨流出から洪水氾濫までを一体的に予測するRRIモデルの開発が進んだ。(2)またRRIモデルで再現する河川流出や洪水氾濫の時空間起源を分析する手法の開発が進み、降雨の時空間起源や流出経路の観点から流出や氾濫水の成分を推定できるようになった。(3)さらに、2011年タイ洪水を中心に、降雨の変動が流出や氾濫に及ぼしている影響や、氾濫原に降った雨が流域全体の氾濫に及ぼしている影響などが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to improve the understanding and prediction of large-scale flooding in the world. (1) This study developed a Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model simulating for both rainfall-runoff and inundation processes simultaneously by taking account also for groundwater and evapotranspiration. (2) It developed also a Time-Space Accounting (T-SAS) scheme coupled with the RRI Model to analyze the temporal and spatial origins of stream water and inundated water. (3) As a result, a various aspects of large-scale flooding, especially for the 2011 Thailand Flooding, has been analyzed with respect to, for example, the effect of rainfall variability and the impact of rainfall over floodplain on runoff and inundation.

研究分野：水工学

キーワード：降雨流出 洪水氾濫 チャオプラヤ川 洪水予測 RRIモデル 時空間起源 地下水 水文

## 1. 研究開始当初の背景

本研究の計画を立案した 2011 年は、タイ王国チャオプラヤ川流域において発生した大規模な洪水が首都バンコクにまで到達し、都市機能を麻痺させる甚大な被害を発生させていた。また、アユタヤ周辺の工業団地における長期間の浸水は、世界経済にも大きな影響を及ぼし、世界のメディアがこの洪水の動向に着目していた。

このような大規模洪水が発生した際、限られた情報をもとに広域の洪水氾濫を俯瞰的に把握し、またその動向を予測するための手段として、本研究では、降雨流出から洪水氾濫までを一体的に予測する手法の確立を目指してきた。本研究で対象とするような水文モデルの応用法は、従来の国内河川流域における治水計画のための水文モデルの応用とは様々な点で異なっている。例えば、全球で得られる衛星地形情報や降雨情報を最大限に応用することにより、世界の各地で素早くモデルを展開する必要がある。そのために使用するモデルは、物理的な機構を反映しつつ、かつシンプルなものでなければならない。また、大規模洪水時には広域の氾濫を伴うことが多いので、従来のように降雨流出と洪水氾濫とを分けて取り扱うのではなく、降雨流出から洪水氾濫までを一体として解析することが望ましいと考えた。

上記の内容は、本課題の前に助成を受けた科研費(若手 B)に、降雨流出氾濫モデル(Rainfall-Runoff-Inundation Model: RRI Model)の開発に着想を得たものである。RRI モデルを用いることにより、例えばパキスタンのインダス川流域を対象にした 2010 年の洪水現象の再現や、2011 年のタイ洪水の緊急対応シミュレーションが可能になっていた。一方、本課題の立案時点で、大規模洪水の現象解明と予測に関して、以下の 3 つの課題解決が重要と考えていた。

1) 短期間の洪水を対象にしてモデルの開発を進めてきたため、タイ洪水のように数カ月にもわたる洪水には必ずしも適さない部分がある。

2) 限られた情報をもとに実施している予測結果が、どの程度の誤差を含んでおり、どのような現地情報を反映することによって、予測の不確実性を低減できるかが明らかでない。

3) 例えばタイ洪水を考えた場合に、下流で被害をもたらした洪水がいつ・どこに降った雨でもたらされたか、という洪水の原因に関わる極めてシンプルな問いに対して、科学的な根拠を持って回答できない。

特に 3) の課題は、洪水を引き起こした降雨の特性を把握するためにも、またダムや都市化の影響を議論するためにも、非常に重要な課題であると考えた。さらに、市街域を氾濫している水が、どのくらいの期間滞留していて、どのような経路を流れてきたも

のかを明らかにすることで、例えば、洪水災害をもたらす疫病蔓延の過程を解明するためにも重要な知見を提供できると考えた。

研究代表者は、これまでも降雨流出の滞留時間や空間起源を流出モデルで表現するための研究を行ってきた。しかし、これまでの研究では、主として山間部の森林流域を対象に、河川流出の時間的・空間的な起源を分析してきたため、上記のような大規模洪水の流出や氾濫の時空間起源を分析する研究は、その実務的重要性にも関わらず、研究が十分に進んでいなかった。

## 2. 研究の目的

上述の背景を踏まえて、本研究では、以下の 4 項目について研究を実施した。

1) RRI モデルの鉛直浸透計算法を改良するとともに、蒸発散の影響を考慮することによって、長期にわたる洪水解析により適するように RRI モデルを発展させる。

2) 2011 年のタイ洪水を対象に、詳細な現地観測情報を反映させた降雨流出氾濫解析を実行する。また、2011 年 11 月現在で緊急対応として実施している予測の結果を詳細に検証する。

3) 観測流量や洪水氾濫を正しく再現できることを確認したうえで、河川流出・洪水氾濫の時空間起源を分析する。とくに、2011 年タイ洪水においてバンコク周辺に浸水をもたらした水が、主としていつ・どこに降った雨で構成されていたのかを数値計算によって解明する。

4) 研究期間中に発生する世界の大規模洪水を対象に、緊急対応としての洪水予測、現地データの収集、予測結果の詳細な検証とその原因解明という一連の研究サイクルを実行する。

## 3. 研究の方法

### (1) RRI モデルの概要

RRI モデルは、対象とする流域を河道と斜面とに分け、降雨を入力して河川流量から洪水氾濫までを一体的に解析する。河道のあるグリッドセルでは、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・堤防高の情報を持つ。降雨は斜面にのみ入力し、河道・斜面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河道と斜面との水のやり取りを計算する。なお RRI モデルは以下の三つの特徴を有す。

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む流域全体の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とがある。RRI モデルでは山地部の側方地中流について、我が国の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、平野部の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と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・地盤高に基づいて、両者間の水の流入を計算する。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。

## (2) 時空間起源追跡法

いつ・どこに降った雨で河川の流量が構成されているかという問いは、図1に示すようにハイドログラフを降雨の時間起源と空間起源に応じて分離することに相当する。図中左の例では時間を0から4の5成分に分離し、0の時間成分は降雨イベント前から流域に存在していた水を意味している。時間成分1から4が対象期間中に降った雨に相当し、ハイトグラフとハイドログラフの色分けはそれぞれの時間に降った雨が流出している様子を示す。一方、ハイドログラフを降雨の空間起源に応じて分離するという事は、図1の右に示すような結果を導くことである。この例では流域をAからFに分割し、それぞれの領域に降った雨がどのような成分で流出しているかを示している。同様の考え方は氾濫水にも当てはまる。

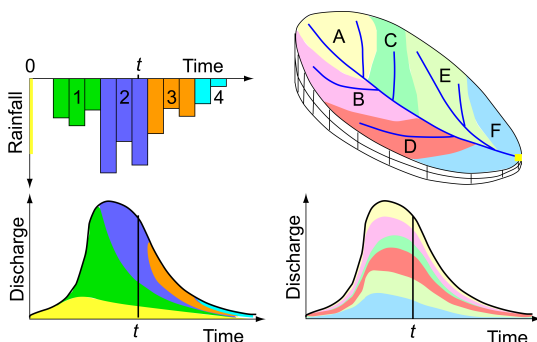


図1 降雨の時間起源と空間起源によるハイドログラフの分離

本課題で議論する時空間起源追跡手法 (Time-Space Accounting Scheme: T-SAS) の目標は、RRI モデルで計算される流出水と氾

濫水がいつどこに降った雨でもたらされているかを分析することである。なお、以下の議論は、空間分布する貯水量を状態変数にとり、その貯水量間の流量を追跡する分布型モデルであれば、いかなるモデルにも適用できる。

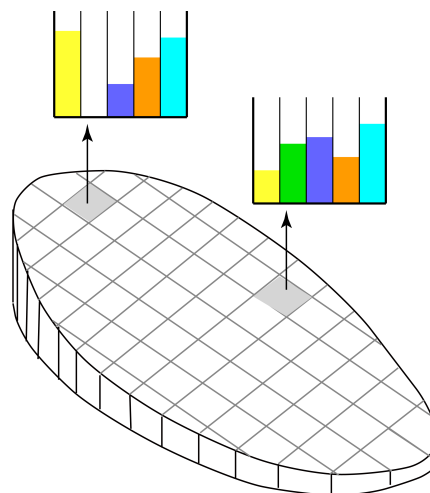


図2 分布型モデルの貯水量の成分分離

上記の T-SAS の目標を達成するために、分布型モデルの各要素に貯留されている水を図2のように時空間起源の違いに応じて成分分離することを考える。ここで、分布型モデルの各要素とは、一つの貯水量を状態変数とするブロックを意味する。RRI モデルの例では、一つの斜面グリッドセルやその中に配置している河道が一つの要素に該当する。中間流と表面流を考慮するグリッドセルではそれぞれ別の要素とみなして追跡することも可能である。ただし以下に示す結果では要素数を制限するため、斜面グリッドセル内部の要素分割は行わない(本研究課題終了時点では、各斜面グリッドセルを地下水・土中水・表流水の要素毎に分離して取り扱えるよう T-SAS 手法を更新した。)

貯水量を成分分離するために T-SAS では要素間の水の混合は移流によってのみ生じるという仮定を置く。この仮定に基づけば、貯水量を成分分離しながら時間更新することは連続式を全ての要素について計算することに帰着する。T-SAS のアルゴリズムについては本報では省略する(詳細は佐山ら、2013 を参照のこと)。

## 3. 研究の成果

以下では、2. 研究目的に示した1) から4)の項目について、それぞれの実施内容と得られた成果を取りまとめたい。項目3)の時空間起源追跡について、結果と考察を示す。

1)まず RRI モデルの改良については、蒸発散の影響を考慮し、土壌水分量に応じて実蒸発散量を計算するように変更することで、タイ・チャオブラヤ川流域においても数十年に

わたる長期の流出・氾濫計算を実行できるようにモデルを改良した。また地表面付近の土層より深い場所にある地下水の影響を考慮できるようにモデルを改良し、特に基底流出部の流出量再現精度の向上を確認した。具体的には、土層の下部にある地下水面の深さを変数にとり、周囲との地下水位の関係で側方に流れるモデルを構成した。また土層中の水と地下水とのやりとりを再現できるようにモデル構築した。

2) 2011年のタイ洪水に対する緊急対応の予測結果は、浸水位のGPS現地計測や河川流量・水位等の水文データと比較し、予測結果を詳細に検証した。またより多くの現地情報が得られた場合に、どの程度予測精度が向上し得たかを情報の項目毎に分析した。

3) 大規模洪水の時空間起源追跡は、本研究課題の中心的内容であり、その詳細は後述する。

4) 2011年のタイ洪水以降、様々な形でRRIモデルの実用化研究を進めてきた。例えば2014年のインド・カシミール地方の洪水では衛星情報を利用して緊急対応の解析を実施した。また洪水時に円滑にモデル適用ができるよう、マニュアルやプログラムツールの整備を進めた。

以上がRRIモデルの開発と応用に関する研究成果のまとめである。以下3)の時空間起源追跡について報告する。

#### (1) 流出・氾濫水の時間起源

チャオプラヤ川全流域に適用したRRIモデルを用いて、2011年タイ洪水の時間起源を分析した。4月から11月まで降雨の生起時刻に応じて月毎に異なる成分を割り当て、ダムなしの条件でT-SASを実行した。図3は上から降雨のハイトグラフ、ナコンサワン(以下C2)地点の流出、下流部の氾濫を成分毎に色分けしている。10月中旬のC2における流出をみると、7月、8月、9月の降雨が全体の約80%を占め、残りの約20%は6月と10月の雨によってもたらされていることが分かる。

上流の洪水氾濫は流出の時間起源に影響を及ぼす。全ての河道を20m掘り下げて氾濫をなくせば、図4のようにピーク流量は約11,000トンまで上昇する。またその成分はより新しいものに代わる。これはチャオプラヤ川流域の洪水流出を再現するうえで、またその成分を分析するうえで、氾濫の影響を考慮することが重要であることを意味する。

次にC2下流で標高30m以下の地域の洪水氾濫に着目する。場所は図5の緑色の領域で、以下、下流氾濫原と呼ぶ。図6の下のパネルに示す結果は、C2の流出と同様に7月、8月、9月の降雨がピーク時の氾濫に寄与していることを示す。ただしC2の流出と比較すると10月の降雨による寄与率が高くなる。

以上のように、RRIモデルの出力をもとに、

2011年タイ洪水をもたらした降雨の時空間起源を分析した。以下に解析の主要な結果をまとめる。

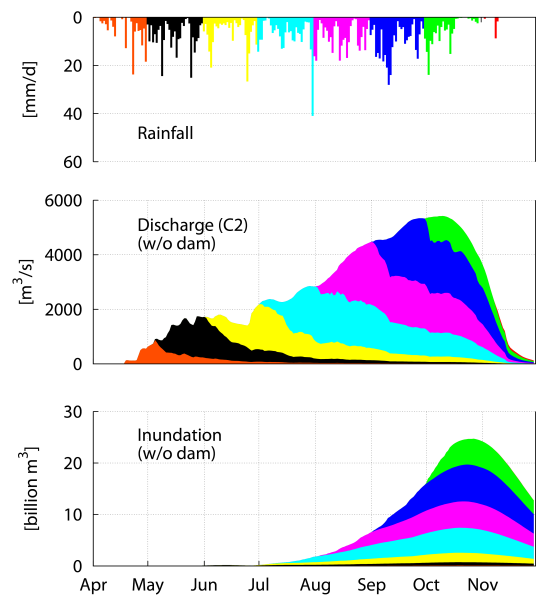


図3 流出・氾濫水の時間起源(ダムなし)

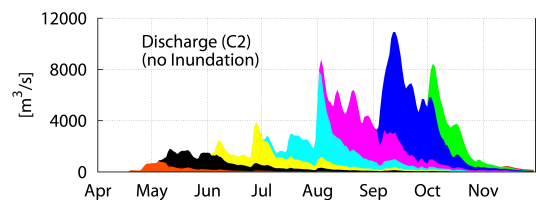


図4 流出の時間起源(ダムなし・氾濫なし)

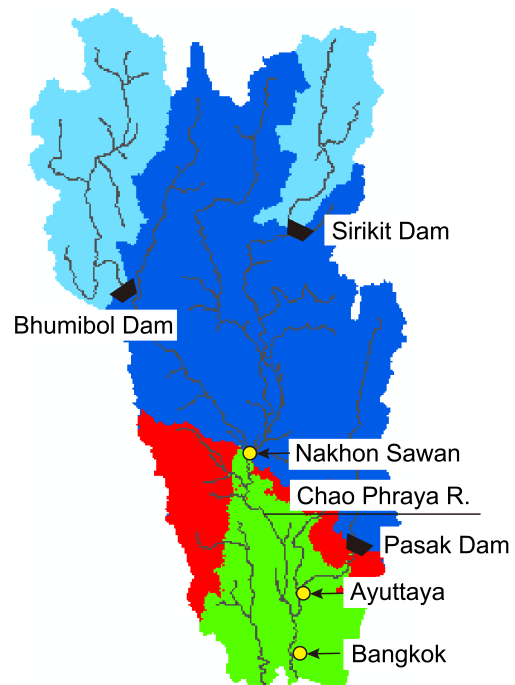


図5 空間起源の色分けに対応したチャオプラヤ川の流域図

- ・ナコンサワン地点(C2)におけるピーク時の河川流出は、その約 80%が7、8、9月に上流域に降った雨で構成されている。
- ・下流部におけるピーク時の洪水氾濫は、7月から10月の4カ月に降った雨で構成されている。また氾濫の約 35%は下流氾濫原に直接降った雨で構成されている。とくにアユタヤ西部およびバンコク東部の領域においては、氾濫水の大部分が内水氾濫である。

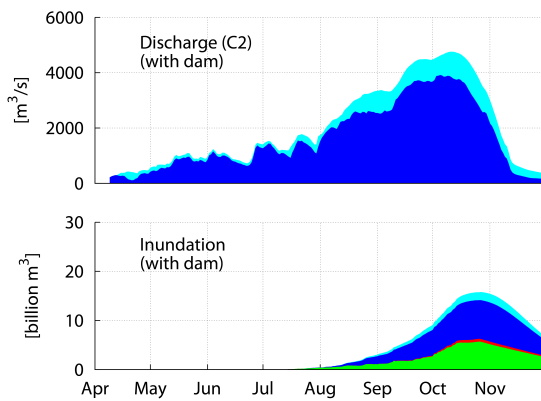


図6 流出・氾濫の空間起源(ダムあり)

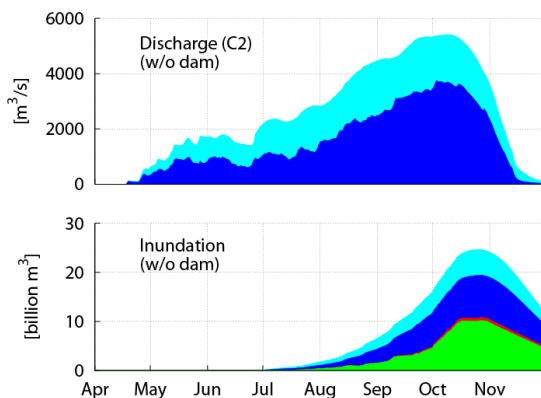


図7 流出・氾濫の空間起源(ダムなし)

- ・C2 におけるピーク流量の約 20%、下流部の洪水氾濫の約 10%はプミポン・シリキットダムからの放流量で構成されている。ダムが無ければ、上流からの外水氾濫が増えるとともに、下流氾濫原の内水氾濫も増えて、総氾濫量はピーク時で約 90 億 m<sup>3</sup> 増大する。

この解析は、モデルの各グリッドセルで水が完全に混合し、流出起源が同じであるという仮定に基づいている。上述のように、より詳細に検討するためには、各地点の水を地表流・土壌水・地下水等に分類し、それぞれ異なる成分を持たせることも大切である。そのためには、RRI モデルの改良も必要であり、上述 1) の項目のように RRI モデルで地下水を考慮できるように改良した。さらに、ここで説明した T-SAS をより汎用的に改良し、複数の流出過程を考慮する場合に、異なる要素として取り扱うようにしている。

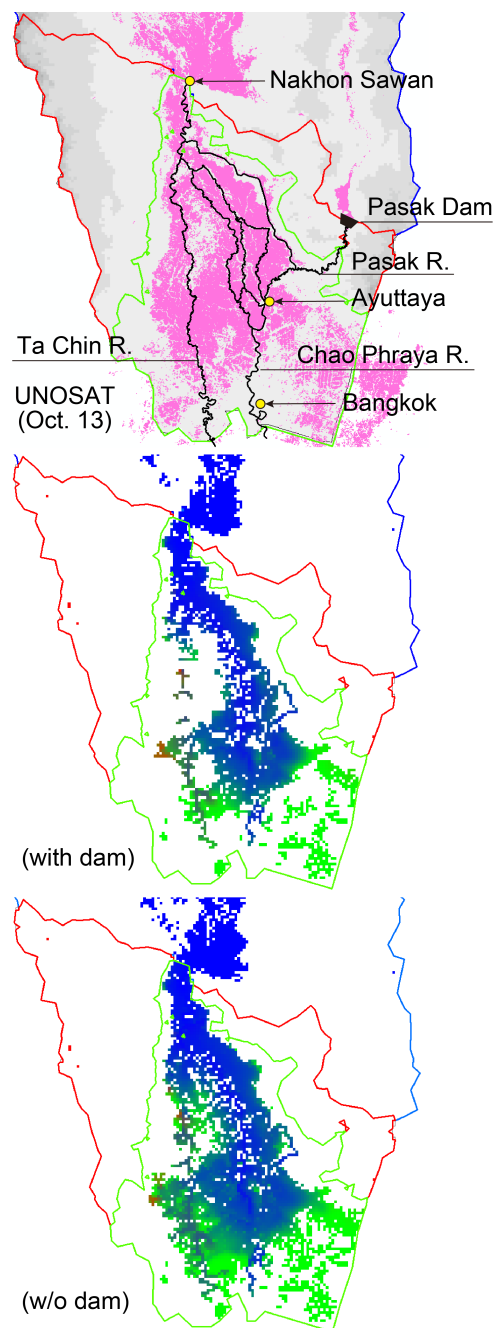


図8 10月13日時点の衛星による浸水想定域(上)と下流氾濫域の空間起源(中:ダムなし,下:ダムあり)

#### 4. 研究成果

本研究期間全体を通して、地下水や蒸発散の影響も考慮しながら長期連続で降雨流出から洪水氾濫までを一体的に予測する RRI モデルの開発が進み、タイ・チャオプラヤ川流域におけるリアルタイムの浸水予測を始め、様々な形でモデルの実用化や他の研究への応用化が進んだ。

また RRI モデルで再現する河川流出や洪水氾濫の時空間起源を分析する手法(T-SAS)の開発が進み、降雨の時空間起源や流出経路の観点から流出や氾濫水の成分を推定できるようになった。

2011年タイ洪水を中心に、RRIモデルやT-SAS手法の適用を通じて、降雨の変動が流出や氾濫に及ぼしている影響や、氾濫原に降った雨が流域全体の氾濫に及ぼしている影響など、大規模洪水現象の解明と予測に関する研究が進展した。

#### 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5件)

Takahiro Sayama, Yuya Tatebe and Shigenobu Tanaka, An emergency response-type rainfall-runoff-inundation simulation for 2011 Thailand floods, Journal of Flood Risk Management, 2015 (in print).

佐山敬洋・小杉賢一郎・岩見洋一, 山体地下水の流動を表現する分布型降雨流出モデルの開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 71, No. 4, I\_331 -I\_336, 2015.

佐山敬洋・建部祐哉・藤岡 奨・牛山朋來・萬矢敦啓・田中茂信, 2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 69, No. 1, 14-29, 2013.

佐山敬洋・建部祐哉・藤岡 奨・牛山朋來・田中茂信: 大規模洪水氾濫の時空間起源分析に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 69, No. 4, I\_463-I\_481, 2013.

建部祐哉・佐山敬洋・牛山朋來・藤岡 奨・田中茂信: チャオプラヤ川流域における長期降雨流出氾濫解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 69, No. 4, I\_457-I\_462, 2013.

##### [学会発表](計7件)

Takahiro Sayama: A New Challenge in Flood Runoff and Inundation Forecasting for Early Warning System, Regional Seminar on Challenges and Responses to Extreme Climatic Events, IWA and TWRA, November 25-26, AIT, Thailand, 2014.11.25.

Takahiro Sayama, Yuya Tatebe, Shigenobu Tanaka: How Sensitive is Large-scale Flood Inundation to Rainfall Variability? -Water Balance Analysis Based on Basin-wide Rainfall-Runoff-Inundation Simulation-, San Francisco, AGU Fall Meeting, 2013.12.13.

佐山敬洋: 世界の水災害予測におけるPUBの挑戦, 水文・水資源学会創立25周年記念シンポジウム, 神戸大学百年記念館, 2013.9.27.

佐山敬洋, 建部祐哉, 田中茂信: 大流域

を対象にした降雨流出氾濫現象の長期水収支解析, 水文・水資源学会, 神戸大学, pp. 30 - 31, 2013.9.25.

Takahiro Sayama: Understanding of Large-Scale Rainfall-Runoff-Inundation Process, The 4th International Seminar on Typhoon and Flood Defense Strategies, 2013 Korea Water Resources Association (KWRA), Honam University, Gwangju, Korea, 2013.5.23.

Takahiro Sayama, Yuya Tatebe, Shigenobu Tanaka: Large-scale Flood Simulation with Rainfall-Runoff-Inundation Model in the Chao Phraya River Basin, Vienna, EGU Conference, 2013.4.12.

Takahiro Sayama, Yuya Tatebe, Shigenobu Tanaka: Understanding of Large-Scale Flood Processes with a Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model and Time-Space Accounting Scheme (T-SAS), IAHS 90th Anniversary Prediction in Ungauged Basins, 23-25 October 2012, TU-Delft, Netherland, 2012/10/23.

##### [図書](計1件)

Runoff Prediction in Ungauged Basins (Ch. 2, Process realism: Flow paths and storage), Ed. by Gunter Blöschl, Murugesu Sivapalan, Thorsten Wagener, Alberto Viglione, Hubert Savenije, Cambridge Press, 2013.

##### [産業財産権]

該当無し

##### [その他]

該当無し

#### 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・主任研究員

研究者番号: 70402930

##### (2) 研究分担者

該当なし

##### (3) 連携研究者

牛山 朋來 (USHIYAMA TOMOKI)

土木研究所・水災害リスクマネジメント国際センター・専門研究員

研究者番号: 50466257