

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06101

研究課題名(和文) 全球河川モデルと衛星高度計を用いた水面下の河道深さ推計

研究課題名(英文) Estimation of river channel bathymetry using a global river model and satellite altimetry

研究代表者

山崎 大 (YAMAZAKI, Dai)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：70736040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：全球河川モデルと衛星高度計を組み合わせ、水面下の河道深さの推定手法の開発に取り組んだ。

河川モデルの基礎情報である水文地形データの高精度化を実施した。複数の誤差成分の除去による世界最高精度の全球標高データMERIT DEMを開発し、さらに各種水域マップを統合して高精度の全球河川データMERIT Hydroを構築した。

高度化した水文地形データを統合した最新版の全球河川モデルを衛星高度計と比較し、河道深さパラメータを最適化するアルゴリズムを構築した。アマゾン川流域で河道深さ推定の実験を行い、河道深さを有効に推定でき、かつ水面標高以外の河川流況変数も改善することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した高精度の水文地形データMERIT DEMとMERIT Hydroは、全球河川モデルの高度化に限らず、地球科学分野の多様な研究に使われる基盤データとなった。2022年6月現在、のべ2000以上の研究者にデータを提供し、多様な研究に活用されている。

河道深さの最適化による全球河川モデルの高度化は、洪水リスク管理や気候変動予測など様々な社会実装につながると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a method to estimate river channel bathymetry by combining a global river model with a satellite altimeter.

First, it was necessary to significantly improve the accuracy of the hydro-topography data. We first developed the world's most accurate global elevation data MERIT DEM by removing multiple error components. We also construct a high-precision global river data MERIT Hydro by integrating various water area maps. As a result, the reliability of floodplain topographical parameters and river channel width parameters of the global river model has been significantly improved, and error information of water surface elevation can be used for estimating channel depth parameters.

Then, we developed an algorithm that optimizes the channel depth parameter so as to reduce the water surface elevation error. River depth estimation experiments in the Amazon basin confirmed the effectiveness of the river depth estimation.

研究分野：水文学

キーワード：全球河川モデル 衛星高度計 河川地形 データ同化

1. 研究開始当初の背景

全球河川モデルは、大陸河川の地表水動態解析、リアルタイム洪水予、温暖化時の洪水リスク推定、気候モデル中の淡水フラックスの計算など、地球水循環研究において学術的・実務的に重要なツールである。研究代表者である山崎が開発を続けている全球河川モデル CaMa-Flood は氾濫源の浸水をサブグリッド物理として扱う点が独創的で、高解像度地形情報の高度な処理技術の開発、高精度・高効率な数値計算スキームの導入、全球モデルとして初めての河道分岐スキームの導入により世界最高水準の洪水予測精度を誇る。これまでに米国航空宇宙局 (NASA) やヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) を始めとして多数の大学や研究機関から公開要請を受け国内外多数の研究機関で地球水循環研究に使用されている。

しかし開発中の全球河川モデル CaMa-Flood には不確実性が残っており、更なる洪水計算の精度向上が求められる。全球河川モデルでは全陸域を格子で区切り、河道網に従って河川流量を計算する (図 1a)。洪水シミュレーションで重要となる氾濫源浸水過程は全球モデルの格子サイズでは解像できないため、地形パラメータを用いてサブグリッド物理過程として表現しており (図 1b)、どうやって現実的な地形パラメータを抽出するかが洪水予測精度を左右する。河道の標高や氾濫源地形関数はデジタル標高モデルから抽出可能で、河道幅は衛星水面マスクから計算できる。しかし、河道深さは衛星からは直接観測できず、全球規模の現地観測データも存在しないため、既往研究では河川流量や流域面積の単調増加関数として与えていた。しかし河道深さは局所的な気候・地形・地質により変動するため、既往の経験的関数は河道深さの空間分布を適切に表現していない。不正確な経験的関数の代わりに、適切な空間分布を持った河道深さデータの構築が全球河川モデルの不確実性の低減に必須である。

衛星からは水面下の地形は直接計測できないが、レーダー・レーザー高度計による水面標高の観測は可能である。また、開発中の全球河川モデル CaMa-Flood は類似モデルと比較して圧倒的な水面標高の再現精度を持つ。そこで、モデルと衛星観測による水面標高の誤差を比較して全球スケールで河道深さパラメータを修正するという着想を得た。本研究では、観測とモデルの誤差から最適パラメータを統計的に推計するデータ同化などの手法を用い、全球河川モデルと衛星高度計の組み合わせによる全球スケールでの河道深さの推定を実現する。

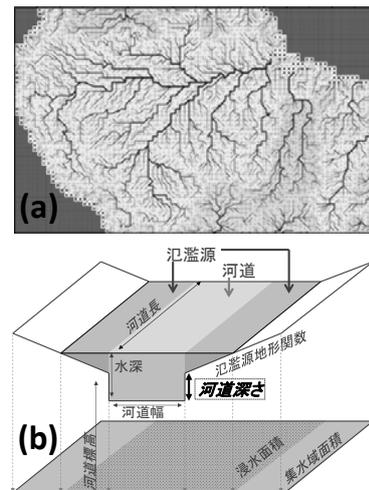


図1 (a)全球河川モデルの河道網
(b) サブグリッド地形パラメータ

2. 研究の目的

本研究課題では、全球河川モデルによるシミュレーションで再現された水面標高と衛星高度計が観測した水面標高とを比較して、データ同化などの統計手法により河道深さパラメータの最適化を行うことを目的とする。

河道深さ推計手法の空間分解能は全球河川モデルの解像度に制約されて約 10km となるため、河川の蛇行に伴う瀬淵構造といった詳細な水面下地形の表現までは難しいが、大陸河川における河道深さ空間分布の全球スケールでの推計は世界初の挑戦となる。

水面標高観測のデータ同化などによる河道深さ推計手法では、全球河川モデルが再現する水面標高の誤差は河道深さパラメータの不確実性に起因するとの仮定を用いる。しかし、実際の全球河川モデルには河道深さ以外の地形や入力流出量データにも不確実性があり、結果として最適化された河道深さにも不確実性が含まれる。そこで本研究課題では、複数の地形パラメータや入力流出量データを用いることで、推計される河道深さデータの不確実性の定量化を行う。

3. 研究の方法

本研究課題では衛星高度計による水面標高の観測値と全球河川モデルによる水面標高の計算値を比較し、その誤差情報から統計手法を用いて河道深さを修正する新アルゴリズムを開発する (図 2)。全球河川モデルでは、河道深さが浅すぎる (深すぎる) と算出される水面標高が高すぎる (低すぎる) という関係が一般的に成立する。そこで、モデルが計算した水面標高が衛星高度計の観測に比べて高すぎる (低すぎる) 場合は、河道深さを深くする (浅くする) という補正を適用する。水面標高の誤差が十分小さくなるまで洪水シミュレーションと補正を繰り返すことで、

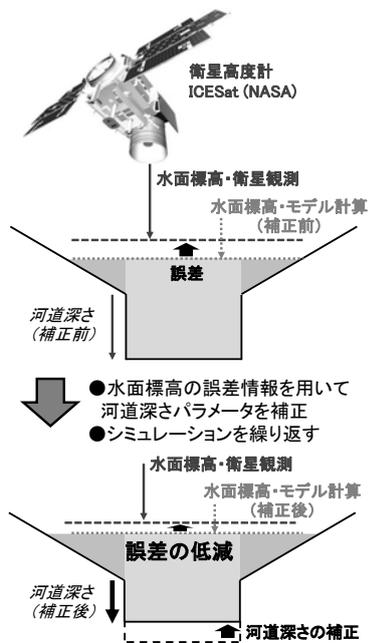


図2 河道深さ推定手法の概要

最適な河道深さパラメータを決定する。

4. 研究成果

まず、河道深さ推定アルゴリズムの実現可能性を評価するために、全球河川モデルの基礎情報となる衛星標高データ (SRTM3 DEM, Viewfinder Panorama DEM, ASTER GDEM, ALOS World 3D DEM) を解析したところ、既存データには大きなバイアスがあるために、そのままでは河川モデルと衛星高度計との水面標高の比較による水面下の河道深さ推定は難しいことが分かった。そのため、2016年度は河道深さ推定アルゴリズムの準備作業として、標高データに含まれる誤差の補正に取り組んだ。標高データ・水面データ・森林データ・衛星高度計データを組み合わせ、点状ノイズ・縞状ノイズ・絶対標高バイアス・植生バイアスの4つの誤差成分を分離・除去するアルゴリズムを開発し、それをSRTM DEMおよびALOS AW3D DEMに適用することで全球高精度の新たな標高データをMERIT DEM構築した(図3)。これにより、特に河川シミュレーションに重要な低平地での地形表現の精度が大幅に向上した。地球全域を対象に複数の誤差成分の包括的な除去に取り組んだのは本研究が初めてであり、本研究で開発したMERIT DEMは全球河川モデルに限らず、地球科学の様々な分野で利用される基盤データとなった。

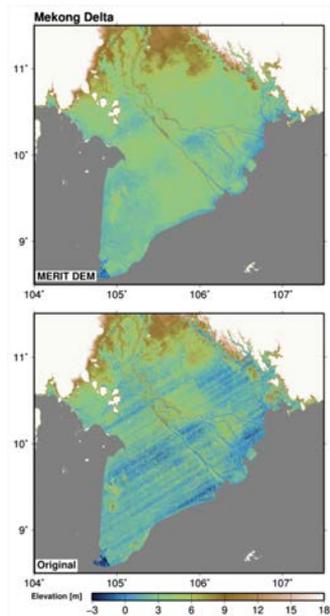


図3:補正前の標高データ(下:SRTM)と本研究で開発したMERIT DEM(上)

つぎに、構築した高精度標高データ MERIT DEM を全球河川モデル CaMa-Flood で利用可能にするため、河川ネットワークを表現する表面流向データ MERIT Hydro の開発に取り組んだ(図4)。標高データ単独では表面流向を精度よく推定できないことが分かったため、最新の高解像度水域データであるG1WBMとGSWO、さらにベクター形式のオープン地図データ OpenStreetMap の水域レイヤを統合した。高解像度で表面流向を精度良く自動計算するアルゴリズムは存在しなかったため、Fortran90を用いて独自の表面流向計算コードを作成した。とくに、乾燥域に多数存在する窪地を、標高データの誤差による凹領域から分離する際に土地利用などに応じて複数の閾値を用いるなどの工夫を行い、ほぼ手作業による修正なしに広域の表面流向データを計算が実現した。さらに、表面流向データと整合性が取れるように、2014年に開発した全球河道幅データGWD-LRを更新した。標高データ・表面流向データ・河道幅データを高精度化したことで、河川モデルと衛星高度計との水面標高比較が用意になり、本課題の最終目標である水面下地形の推定に取り組める状態になった。本研究で開発したMERIT Hydroも、世界最高精度の水文地形データとして、国内外の様々な研究機関で水文学研究の基礎データとして活用されている。

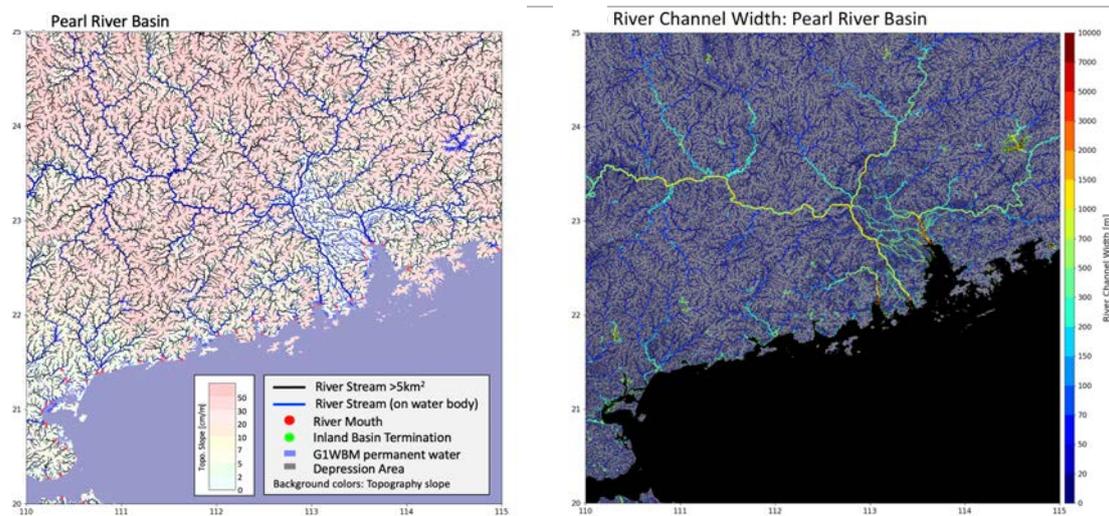


図4: 本研究で開発した全球河川データMERIT Hydroの河道網(左)、河道網と整合性の取れた全球河道幅レイヤー(右)

全球高精度水文地形データ MERIT DEM および MERIT Hydro の開発で、全球河川モデルと衛星高度計による水面標高の直接比較が実現し、衛星高度計との誤差情報を活用した水面化地形（河道深さパラメータ）の推定を行なった。水文地形データの高精度化で氾濫原地形の誤差が小さくなり、また最新の衛星水面データから河道幅パラメータの不確実性が減少したことから、河川モデルが計算する水面標高の誤差は主に河道深さパラメータと入力流出量データのみで説明できると仮定して、広域で河道深さパラメータを推定する手法を開発した。理想モデルと仮想観測を用いた OSSE 実験（Observation System Simulation Experiment）によって、入力流出量データに不確実性があっても、それが小さくなる低水期間に着目することで河道深さ推定の精度をあげることを確認した（図5）。実際の衛星高度計データを用いたアマゾン川流域における実験では、河道深さパラメータの最適化によって、水位・浸水域・河川流量の3つの河川流況変数の再現性が良くなることを確認し、衛星高度計を用いた河道深さ推計手法の実性が立証された（図6）。

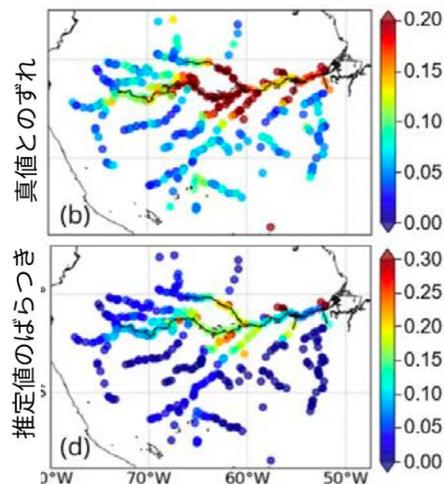


図5: OSSE実験で入力流出量の不確実性を考慮した際の河道深さの推定精度

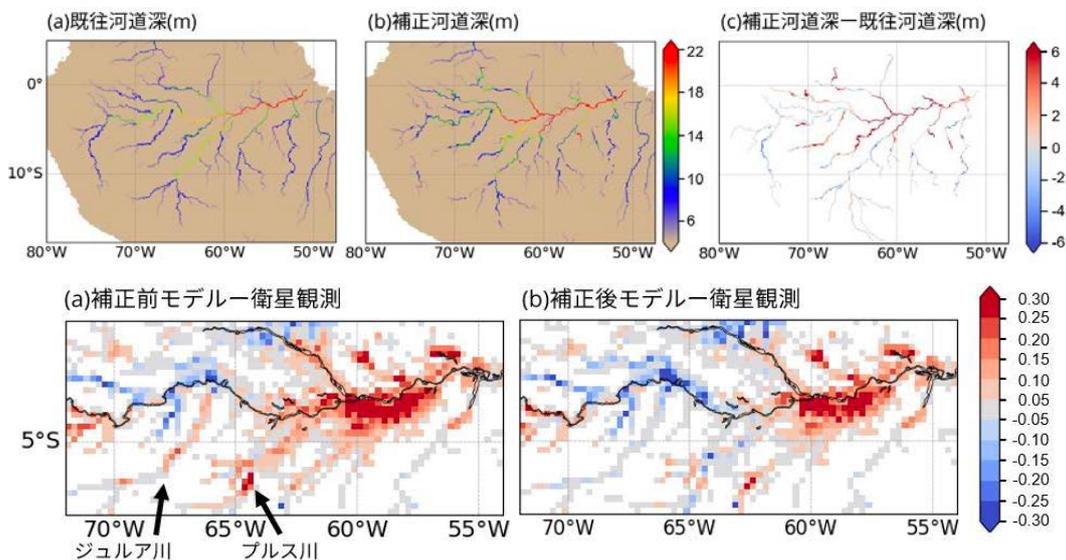


図6: 補正前後の河道深さパラメータの空間分布（上）、および計算された浸水域の衛星観測との比較（下）

しかしながら、実際の衛星観測データを用いた実験では、河道深さをどんなに修正しても水面標高の精度が向上しない地点があることも確認され、モデルが用いている標高データについて、十分な誤差除去を行なった後でもまだバイアスが残っている可能性があることを発見した。また、背水効果が大きく影響する本流および支流合流部では推定精度に限界があることが OSSE 実験によって確かめられた。さらに、現地観測の河道深さとの比較では推定したパラメータとの乖離が見られ、全球河川モデルが考慮していないサブグリッドスケールの河川地形のばらつきを考慮する必要性が示唆された。

このほか、衛星高度計の水面標高観測を河川モデルにデータ同化する際に、どの程度離れた観測データまで活用できるかを検討するために、Variogram を用いて空間相関を求める手法を開発した。河川流れは大气物理と比較して地形に強く依存するため、空間相関が高い領域は観測点からの距離だけでは決まらず、流域の地形や上流集水面積などに大きく影響を受けることが分かり、データ同化で考慮する範囲を Variogram で客観的に求めることが可能になった。

本研究で開発した水文地形データ MERIT DEM および MERIT Hydro は、2019年6月時点で国内外のべ2000以上の研究者に使用される地球科学の基盤データとなった。全球河川モデルの精度向上に想定以上の時間が必要であったため、当初計画にあった全球河道深さデータセットの公開までは達成できなかったらその手法に目処は立っている。水文地形データという基盤情報の整備が地球科学コミュニティに与えた影響を考慮すれば、本研究課題は当初想定以上の重要な成果を挙げたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 4件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Yamazaki Dai, Ikeshima Daiki, Sosa Jeison, Bates Paul D., Allen George, Pavelsky Tamlin | 4. 巻 55 |
| 2. 論文標題 MERIT Hydro: A high resolution global hydrography map based on latest topography datasets | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Water Resources Research | 6. 最初と最後の頁 5053-5073 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019WR024873 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 塩澤拓斗, 山崎大 | 4. 巻 75(2) |
| 2. 論文標題 衛星観測水面標高データを用いた河川氾濫モデルの河道深パラメータの推定 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学) | 6. 最初と最後の頁 259-264 |
| 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 Menaka Revel, Daiki Ikeshima, Dai Yamazaki, Shinjiro Kanae | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 A Physically Based Empirical Localization Method for Assimilating Synthetic SWOT Observations of a Continental-Scale River: A Case Study in the Congo Basin | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Water | 6. 最初と最後の頁 829 ~ 829 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.3390/w11040829 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 山崎大, 富樫冨佳, 竹島滉, 佐山敬洋 | 4. 巻 74 (5) |
| 2. 論文標題 日本全域高解像度の表面流向データ整備 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学) | 6. 最初と最後の頁 163-168 |
| 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 Menaka REVEL, Dai YAMAZAKI and Shinjiro KANAE | 4. 巻 74 (5) |
| 2. 論文標題 Model Based Observation Localization Weighting Function for Amazon Mainstream | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学) | 6. 最初と最後の頁 157-162 |
| 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 Dai Yamazaki, Daiki Ikeshima, Ryunosuke Tawatari, Tomohiro Yamaguchi, Fiachra O'Loughlin, Jeff C. Neal, Christopher C. Sampson, Shinjiro Kanae, and Paul D. Bates | 4. 巻 44 |
| 2. 論文標題 A high-accuracy map of global terrain elevations | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Geophysical Research Letters | 6. 最初と最後の頁 5844-5853 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL072874 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Menaka Revel, Dai Yamazaki, Shinjiro Kanae | 4. 巻 74(4) |
| 2. 論文標題 ESTIMATING GLOBAL RIVER BATHYMETRY BY ASSIMILATING SYNTHETIC SWOT MEASUREMENTS | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学) | 6. 最初と最後の頁 307-312 |
| 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 Fiachra E. O'Loughlin, Jeffrey Neal, Dai Yamazaki, Paul D. Bates | 4. 巻 52 |
| 2. 論文標題 ICESat-derived inland water surface spot heights | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Water Resources Research | 6. 最初と最後の頁 3276-3284 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2015WR018237 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Dai Yamazaki, Mark A. Trigg | 4. 巻 540 |
| 2. 論文標題 Hydrology: the dynamics of Earth's surface water | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Nature | 6. 最初と最後の頁 348-349 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1038/nature21100 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Dai Yamazaki |
| 2. 発表標題 Global river routing & flood inundation modelling: Recent advances and future perspective |
| 3. 学会等名 Hydro-JULES: Next Generation Land-surface and Hydrological Predictions (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Dai Yamazaki |
| 2. 発表標題 MERIT DEM: a high-accuracy global elevation map by multi-component error removal |
| 3. 学会等名 Geomorphometry 2018 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Dai Yamazaki, Daiki Ikeshima, Ryunosuke Tawatari, Tomohiro Yamaguchi, Fiachra O'Loughlin, Jeff C. Neal, Christopher C. Sampson, Shinjiro Kanae, and Paul D. Bates |
| 2. 発表標題 MERIT DEM: A new high-accuracy global digital elevation model and its merit to global hydrodynamic modeling |
| 3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Dai Yamazaki, Daiki Ikeshima, Jean-Francois Vuillaume, Shinjiro Kanae |
| 2. 発表標題 Global WSE assimilation to CaMa-Flood |
| 3. 学会等名 SWOT Science Team Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Dai Yamazaki |
| 2. 発表標題 Global hydrodynamic modelling of flood inundation in continental rivers: How can we achieve it? |
| 3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2016 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Dai Yamazaki, Daiki Ikeshima, Ryounosuke Tawatari, Shinjiro Kanae |
| 2. 発表標題 New and better global terrain elevation data for global hydrology modelling |
| 3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2016 (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Dai Yamazaki |
| 2. 発表標題 New and better topography datasets for global flood modelling |
| 3. 学会等名 Global Flood Partnership Conference 2016 (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山崎大, 池嶋大樹 |
| 2. 発表標題 ICESatレーザー高度計を用いたSRTM DEMの高精度化 |
| 3. 学会等名 水文・水資源学会2016研究発表会 |
| 4. 発表年 2016年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/index.html 日本域表面流向マップ http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/JapanDir/index.html MERIT DEM http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/ |
|--|

| | | |
|---------------------------|-----------------------|----|
| 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 |