

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04586

研究課題名(和文) インドネシア・スマトラ島の熱帯林伐採が下流湿地を含む流域水循環に及ぼす影響評価

研究課題名(英文) Effective of deforestation in Sumatra island in Indonesia on hydrologic cycle at the river basin scale including downstream wetland

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) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：インドネシア・スマトラ島を対象に、森林伐採とプランテーションの斜面で地下水位を観測した。天然林斜面の方が、相対的に地下水位が浅く(0~4 m)、斜面下端では降雨に対して大きく変動していた。一方、パーム林の斜面上端では地下水位がより深い位置(6~8 m)に存在し、降雨に対する応答速度は緩やかであった。両斜面とも、雨水の大部分は地下に浸透していることが分かった。以上の、観測事実を踏まえた流域スケールのモデリングの結果、土地利用変化による洪水流出への影響は、当初想定していたよりも小さいことが分かった。一方、将来の気候変動の影響が大きく、泥炭湿地帯では洪水氾濫の頻度や規模が増大することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スマトラ島における顕著な土地利用の変化は、流域水循環に大きな影響を与えるものと仮説を立てて研究を開始したが、斜面観測の結果に基づいて構築した流域スケールの水文モデリングの結果によれば、その下流域における洪水への影響は限定的であることが明らかになった。その理由は、天然林、アブラヤシ林斜面のいずれも、降雨の多くが表層土壌に浸透をして、厚い土層を流れる側方流が流出の主要な成分であることに起因している。なお、土地利用に比べて、将来の気候変動の影響が大きく、当該流域では、下流泥炭湿地に広がる洪水氾濫の頻度が高まる、より深刻化することが懸念された。

研究成果の概要(英文)：Groundwater levels were observed on the slopes of natural forests and plantations in Sumatra, Indonesia. The groundwater level was relatively shallow (0-4 m) on the slope of the natural forest, and the level fluctuated rapidly to storms especially at the foot of the slope. On the other hand, on the slope with palm forest, the groundwater level was deeper (6 to 8 m) and the response speed to rainfall was slower near the ridge. In both cases, most of the rainwater penetrated underground and subsurface flow dominate storm runoff.

The above findings were reflected to the hydrologic modeling. The model simulation suggested that the impact of land use changes on flood runoff is comparatively smaller. On the other hand, the impact of future climate change will be larger, and the frequency and severity of flood inundation will increase in peatland area in the downstream.

研究分野：水文学

キーワード：森林伐採 流出・氾濫 RRIモデル パーム椰子 土壌水分 地下水 スマトラ島 バタンハリ川流域

1. 研究開始当初の背景

インドネシア・スマトラ島では1985年から2009年までの25年間に天然林の約50%が消失し、アブラヤシやアカシアのプランテーション林が拡大した。天然林の伐採は、蒸散量の変化や土壌流失をもたらし、洪水流量の増大や、乾季の低水流量の減少を引き起こす。一方、スマトラ島の流域下流部には、生態系豊かな湿地帯が広がっていたが、政府主導で農地転用が進められてきた。極度に酸化した泥炭湿地では期待されたほど収率が上がらず、乾燥化した泥炭湿地では火災も頻発し、その煙害は国際問題にまで発展している。放棄された泥炭湿地の環境復元が検討されているものの、上流の森林伐採の影響が河川の流況変化として顕在化しつつあり、元の湿地環境に回復できるかは自明でない。

熱帯雨林の水文環境については、これまでもフラックスタワー観測による蒸発散の観測や、試験流域の流量観測が進められてきた。またインドネシアの泥炭湿地を対象に、排水管理が地下水に及ぼす影響の評価や、温室効果ガスの排出量推定などの研究も進んでいる。

一方で、上流の熱帯雨林伐採と大規模プランテーションの拡大が、河川の流況をどのように変化させ、下流泥炭湿地を含めた水文環境にどのように影響を及ぼしているかを流域全体の視点から議論した研究は十分に進んでいない(図1)。上流域の降雨流出から下流域の浸水現象までを流域一体的でモデル化し、上流の流況変化の影響を加味した下流湿地の水管理施策を提言することが、この地域の環境保全と防災上重要な課題となっている。

このような課題に適するモデルとして、これまで降雨流出と洪水氾濫を一体的に解析する降雨流出氾濫モデル(Rainfall-Runoff-Inundation: RRIモデル)の開発を進めてきた。このモデルは、二次元の拡散波近似式によって降雨の流動をグリッドセル毎に追跡するモデルであり、河川に流れ込むまでの降雨流出過程と、河川から低平地に広がる浸水過程を一体的に解析できる。RRIモデルは、アジア諸国の水文予測にも適しており、タイ・チャオプラヤ川流域や、パキスタン・インダス川流域では洪水予測の基礎モデルとして実証研究を進めてきた。RRIモデルの各グリッドセルには斜面の流出現象を再現する要素モデルを適用する。たとえば日本のような温帯林を対象にする場合は、表層土壌を流れる飽和側方流が支配的な流出過程であり、その過程に焦点を当てた斜面モデルを適用する。また最近の森林水文学の知見より、土壌から基岩への浸透とその湧出が土壌中の飽和側方流に影響を及ぼしていることが明らかになってきた。そのため、その効果を反映した斜面要素モデルを開発した。

一方、熱帯林の流出過程は、厚い風化土壌と時空間的に集中した豪雨による表面流出が特徴である。しかし、この地域の流出特性を的確に反映する斜面要素モデルの開発は不十分である。これはRRIモデルに限ったことではない。欧米や日本で開発された水文モデルの多くは、温帯林の観測知見に基づいたものであり、熱帯林への適用を十分に検証することなく、そのまま援用されることが多い。しかし、土壌層の不飽和帯の表現が不十分のため、流出が急激に変化するような観測状況を正しく再現できないことを経験する。熱帯林の流出機構の解明とモデリングは、Nature誌でもその重要性が呼びかけられるほど世界的に注目された課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、水文過程のなかでも山地森林斜面の降雨流出現象に着目し、土壌水分量と地下水位の変動を観測する。そのうえで、温帯林における既往研究と比較しながら熱帯林の流出機構の特徴を明らかにする。また森林伐採後の代表的な土地利用であるアブラヤシのプランテーション斜面を対象に、同様の観測を実施し、森林伐採の影響が流出現象に及ぼす影響を調べる。観測知見を反映する斜面要素モデルを開発し、スマトラ島の河川流域に適用するRRIモデルに実装する。最後に長期の降雨流出氾濫シミュレーションを実行し、上流の森林伐採の影響を加味したうえで、複数のシナリオ解析に基づく低平湿地の水管理施策を提言することを目的とする。

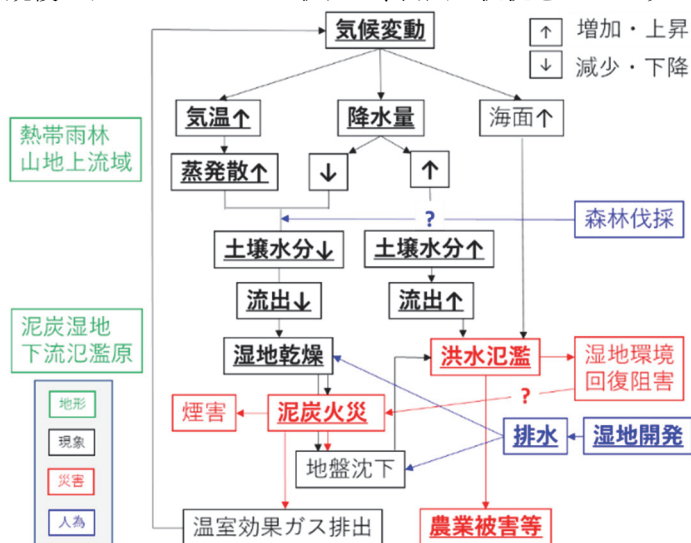


図1 熱帯流域と泥炭湿地における気候変動影響と土地利用変化の影響

3. 研究の方法

インドネシア・スマトラ島のバタンハリ川流域を対象に、T1)フィールド調査、T2)現地観測、T3)リモートセンシング調査、T4)流域水文シミュレーションを実施し、上流域の森林伐採の影響を加味した下流湿地の水管理施策を定量化する。具体的には、T1)森林政策や産業構造も含めた現地情報の収集、T2)試験流域と対象河川流域の天然林・二次林斜面を対象にした土壌水分・地下水位観測、T3)土地利用変化の変遷と下流湿地帯における浸水時期・範囲のリモートセンシング調査、T4)熱帯林とその伐採の機構を表現する斜面要素モデル開発と RRI モデルを用いた長期水文シミュレーションを実施し、そのうえで複数の水管理施策に基づくシナリオ分析を行う。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を、主として T1)、T2) のフィールド調査と現地観測による斜面スケールの結果と、その知見に基づいてバタンハリ川流域全域で実施した T3)、T4) のリモートセンシングおよびシミュレーションによる結果とに分けて、その要点を以下に報告する。

① 熱帯林斜面の降雨流出現象に関する研究

本研究では、熱帯雨林とパーム林が隣接する斜面としてバタンハリ川流域の上流部に観測サイトを設置した。2017年8月に熱帯雨林のサイト(以下、SK)で深さ約5m程度の観測井を3本設置し、以降、順次観測項目を増やして観測を継続してきた。図2(a)に2018年5月から2018年9月までの地表から地下水面までの深さを示す。例えばSK1付近の土層厚は約4.5mであり、乾季でも深さ3m程度の位置に地下水面が存在している。また図2(b)に示す降雨イベントに着目すると、90cm、150cmの深さに設置した土壌水分計が降雨に対して先に応答し、その後直ちに地下水が上昇していることが分かる。SK1は斜面下端に位置しており、総雨量や降水強度が相対的に小さいイベントでは、上流に降った雨が起源となり、地下水面だけが上昇することもある(図2(c)、(d))。一方、図2(b)のように降水強度が大きいイベントでは、当該地点の鉛直浸透によって雨水が深部まで浸透し、短時間の間に地下水を涵養している可能性が示唆される。

熱帯雨林(SK)、パーム林(以下、PR)斜面において、地表面から0、30、60cmの深さで土壌サンプルを採取し、室内実験を実施した。粒径分布を計測した結果、SKの土壌はシルト質粘土ロームに、PRの土壌は砂質粘土ロームに分類された。飽和透水係数を計測した結果、両サイトともに透水係数が高く、深度によって透水係数に明確な違い

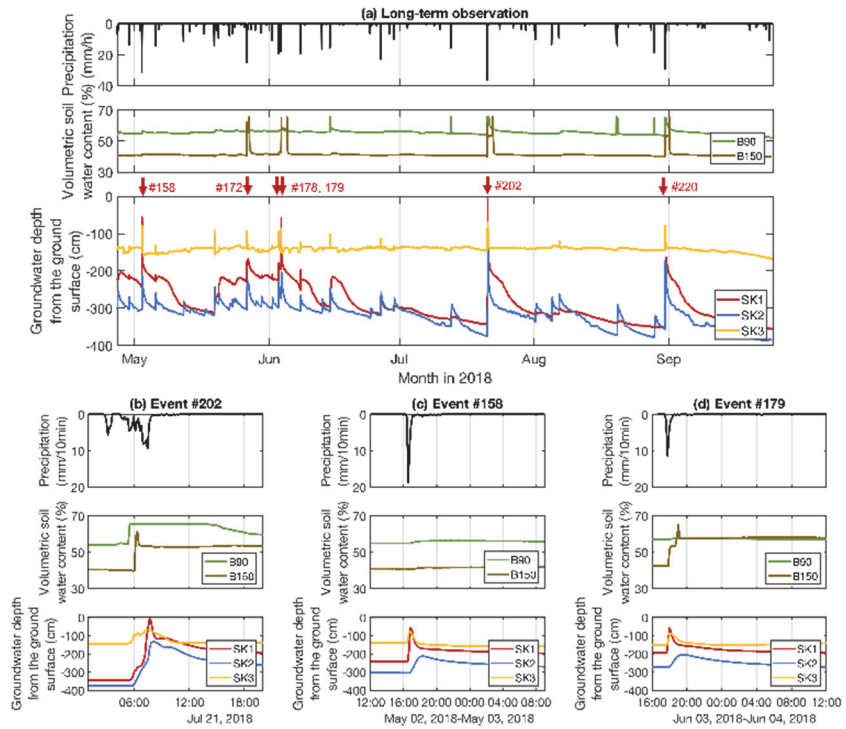


図2 熱帯林斜面(SK)における地下水位と土壌水分量の観測結果

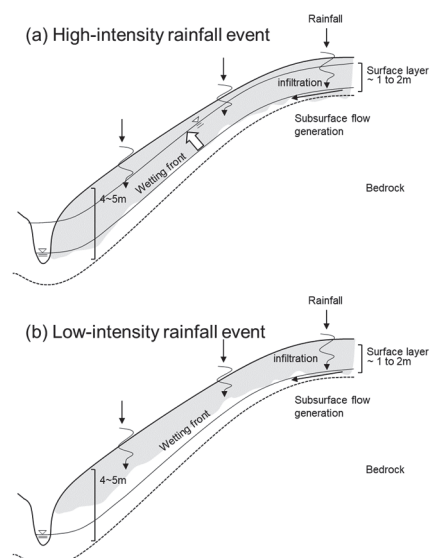


図3 熱帯林斜面(SK)における観測結果に基づく降雨流出過程の概念図

は確認されなかった。一方、土壌水分曲線は、10~1000 cm の負圧下でも体積含水率が 45~55 % に維持された（飽和体積含水率は 65 %）。このように高い透水性と保水性が共存している点が本対象地域の土壌の特徴であり、これは発達した団粒構造に起因しているものと考えられた。

観測から得られた土壌特性を反映して鉛直一次元の不飽和浸透流解析を行った。高い透水性と保水性より、イベント中に降雨と同程度の雨水が地下水まで浸透した。最終浸透能は熱帯雨林の SK において約 400 mm/h であるのに対し、パーム林斜面 (PR) ではそれが約 1/20 になる。これは森林伐採やパーム栽培時の圧密が表層の最終浸透能を低下させたものと考えられる。表層部 5 cm の透水性を 1/20 にして土地利用変化を模擬した結果、PR では 90 cm の深さにおける土壌水分の応答が約 1 時間遅れ、地下水面への流出フラックスのピーク強度が約 30% 小さくなった。また乾季のパーム林では積算フラックス量が森林より 12% 小さくなった。この結果は、森林からパーム林への土地利用変化が、乾季の低水流量を減少させる可能性を示唆している。ただし、両サイトでも降雨強度に比べると最終浸透能が大きく、降雨の大部分は地下に浸透して斜面下端に流下することが分かった (図 3)。

② 気候変動と土地利用変化が下流部泥炭湿地の洪水に及ぼす影響

気候変動・土地利用変化の影響を評価するためのハザード評価モデルは、観測結果の入出力関係を再現するだけでなく、環境場の変化に対する応答を予測できることが求められる。バタンハリ川流域に適用する RRI モデルの空間解像度は 15 sec (約 500 m) とし、地形データは HydroSHEDS を用いる。現地調査の結果から、厚い土層内を流れる飽和側方流と基岩層を流れる地下水流とを主要な流出成分と捉えて、その構造を反映するように RRI モデルの適用法を提案した。さらに、蒸発散と厚い土層厚の効果も既存のモデル構造に適用することで、長期的な河川流出の再現性が向上することを示した。加えて、地下水モデルを導入することで、元のモデル構造では顕著となる乾季の河川流量の過小評価傾向を解決した。その結果、衛星データから推測された洪水氾濫域と比較して、RRI モデルは妥当な洪水氾濫域が再現できることを示した (図 4)。

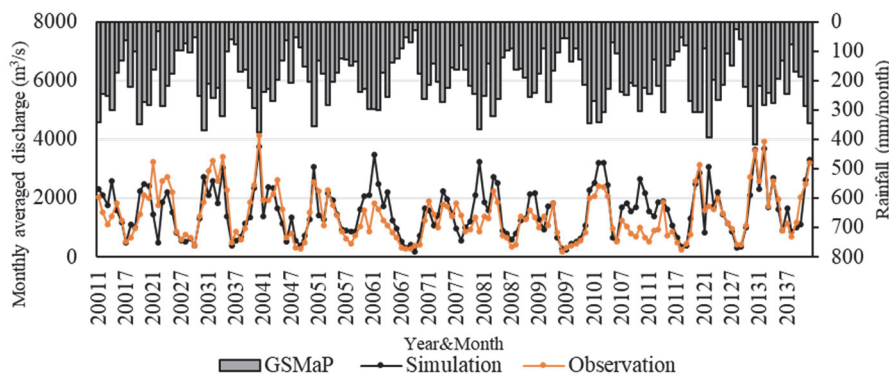


図 4 バタンハリ川流域を対象とした RRI モデルの河川流量再現計算

続いて、領域気候モデル (NHRCM) によってダウンスケーリングされた降雨量分布を RRI モデルに入力して、気候変動が洪水流出と氾濫に及ぼす影響を評価した。その際、降雨データのバイアス補正が必要となる。通常のクオンタイルマッピング法を適用した場合、河川流量の再現性は向上する一方、浸水の再現性に過大評価傾向がみられた。その理由は、領域気候モデルの出力に含まれる降雨分布の空間変動が、実際に観測される降雨分布の変動よりも大きいためであり、流域平均雨量とともに空間変動のバイアスも補正することによって、流量と浸水の両方の再現性を向上できることを明らかにした。さらに、補正した降水分布を RRI モデルに入力した結果、20 年の再現期間に相当する浸水量が、現在気候に比べて将来気候では約 3.3 倍増加することを明らかにした。

将来の気候変動と土地利用変化の相互作用が洪水氾濫に及ぼす影響を比較した。まず、将来の土地利用変化を予測するために、土地利用変化予測モデル (CLUE モデル) を用いて、2040 年時点の土地利用分布を推定した。次に、1990 年と 2040 年の各土地利用の鉛直浸透係数を RRI モデルと SWAT モデルに適用し、土地利用変化の河川流量への影響を推定した。また、バイアス補正された将来降雨情報を RRI モデルと SWAT モデルに適用して、気候変動の河川流量への影響を推定した。両モデルとも、気候変動の影響の方が、土地利用変化の影響よりも流況に及ぼす影響が大きく、年最大河川流量が顕著に増加することを示していた。その原因は、その原因として、森林が農地に転換されて、表層の鉛直浸透能が低下した場合においても、特に山地域では主要な流出成分が飽和側方流を含む地下水流出であり、表層土壌の変化が流域全体の流況に影響しないためであると考えられた。

最後に、気候変動による浸水域の拡大が、流域下流部に広がるアブラヤシの植林によるプランテーション農業に及ぼす影響を評価した。文献調査に基づき、浸水期間ごとに植林 3 年以内のアブラヤシが死滅する可能性を示す被害関数を求めた。次に、RRI モデルから推定された年最大浸水期間と被害関数を用いて、植林 3 年以内のアブラヤシの致死率マップを作成し、気候変動シナ

リオのもとで、致死率 50 %を超える領域が、泥炭ドームと呼ばれる微高地（現在の主要なプランテーション農地）に拡大する可能性を示した。また、浸水が泥炭湿地に拡大することにより、地下水管理が難しくなり、アブラヤシ農業が持続できなくなる可能性を指摘した。これは、土地が放置され、火災リスクが増加する可能性も示唆している（図 1）。アブラヤシは 20 から 30 年の周期で植え替えを必要とするため、気候変動による浸水リスクの増大を踏まえた適応策が必要となる。

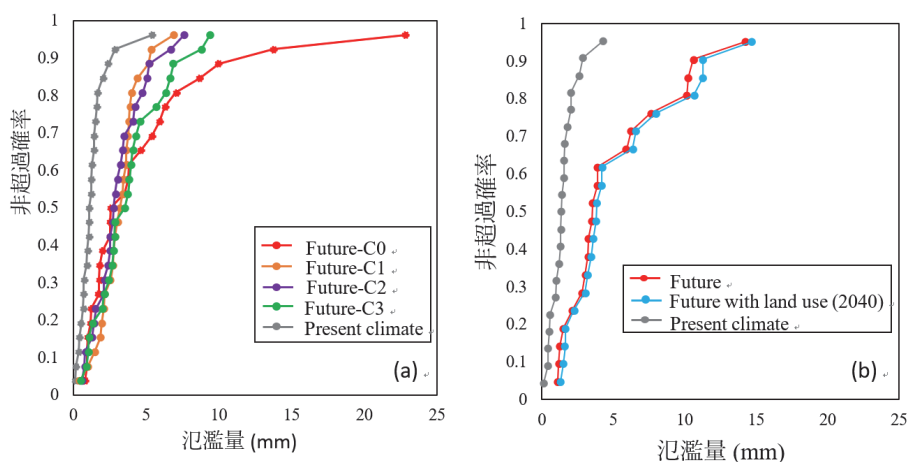
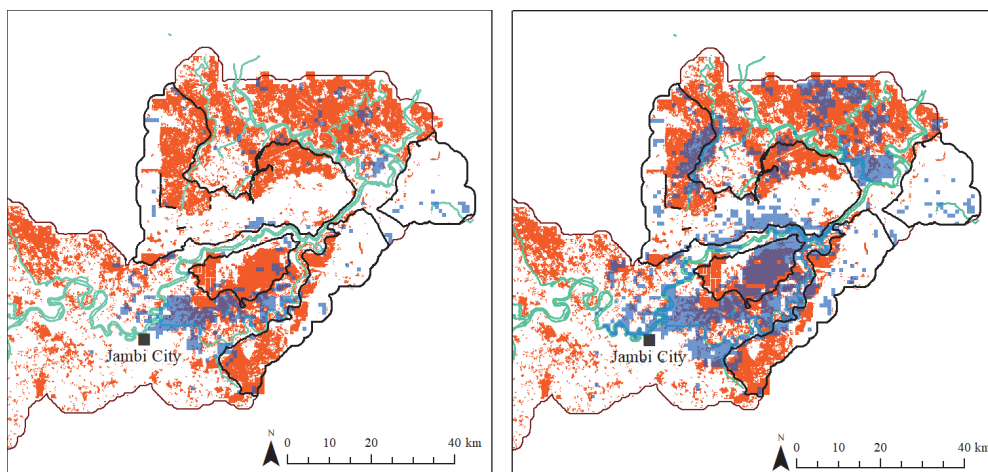


図 5 (a) AGCM と (b) NHRCM の年最大氾濫量の累積分布の比較: AGCM の現在気候、将来シナリオ-C0、C1、C2、C3 と NHRCM の現在気候と将来シナリオ



■ 3年致死率 50%以上の浸水域 ■ アブラヤシプランテーション □ 泥炭湿地 — 河川

図 6 植林後のアブラヤシの 3 年以内の死亡率 (a) 現在気候と (b) 将来気候

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamamoto Kodai, Sayama Takahiro, Apip	4. 巻 8
2. 論文標題 Impact of climate change on flood inundation in a tropical river basin in Indonesia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-020-00386-4	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 Sayama Takahiro, Araki Ryoko, Yamamoto Kodai, Apip	4. 巻 15
2. 論文標題 Characteristics of soil and hillslope responses in humid tropical forests in Sumatra, Indonesia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrological Research Letters	6. 最初と最後の頁 23 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3178/hrll.15.23	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 Mia Siska Yamamoto Eva, Sayama Takahiro, Yamamoto Kodai, Apip	4. 巻 14
2. 論文標題 Comparison of runoff generation methods for land use impact assessment using the SWAT model in humid tropics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Hydrological Research Letters	6. 最初と最後の頁 81 ~ 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3178/hrll.14.81	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 菅原快斗・佐山敬洋・寶 馨	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 分布型モデルへの適用を目的とした鉛直浸透流の観測とリチャーズ式の解析解による再現計算	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 1243-1248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.75.2_1_1243	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 山本浩大・佐山敬洋・Apip・竇 馨	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 湿潤熱帯流域における降雨流出氾濫モデルの適用性に関する研究	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 253-258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.75.2_1_253	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

[学会発表] 計15件(うち招待講演 3件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Eva Mia Siska Yamamoto, Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Apip
2. 発表標題 Mapping of mature and young oil palm distributions in a humid tropical river basin for flood vulnerability assessment
3. 学会等名 International Conference on the Ocean and Earth Sciences 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐山敬洋・山本浩大・荒木稜香・Apip・Siska Eva・竇馨
2. 発表標題 湿潤熱帯流域の降雨流出氾濫現象とモデリング
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 インドネシア・スマトラ島の熱帯雨林における降雨流出特性の現地観測とモデリング
2. 発表標題 佐山敬洋・荒木稜香・山本浩大
3. 学会等名 水文・水資源学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eva Mia Siska, Takahiro Sayama, Apip
2. 発表標題 Comparison of runoff generation methods in the SWAT model for land use change impact assessment
3. 学会等名 水文・水資源学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本浩大・佐山敬洋・Apip
2. 発表標題 湿潤熱帯流域における気候変動が流域規模の洪水氾濫に及ぼす影響評価
3. 学会等名 水文・水資源学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原快斗・佐山敬洋・實 馨
2. 発表標題 分布型流出モデルへの適用を目的とした鉛直不飽和浸透の現地観測と解析
3. 学会等名 水文・水資源学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Ryoko Araki, Apip, Eva Mia Siska, Kaoru Takara
2. 発表標題 Impacts of Climate Changes on Hydrological Cycle in a Humid Tropical River Basin in Sumatra, Indonesia
3. 学会等名 The 8th ICWRER2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Ryoko Araki, Apip, Eva Mia Siska, Kaoru Takara
2. 発表標題 Lessons Learned in Hydrology and Flood Mapping from the Batanghari River Basin
3. 学会等名 International Conference on Marine and Coastal Engineering and Sciences (ICMACES2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐山敬洋・山本浩大・荒木稜香・Apip・Eva Mia Siska・菅原快斗・山田真史
2. 発表標題 降雨流出現象の解明とRRIモデルの開発
3. 学会等名 次世代陸モデル開発・応用・社会実装に関する合同ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Sayama, Ryoko Araki, Kodai Yamamoto, Apip, Kaoru Takara
2. 発表標題 Characteristics of Soil and Hillslope Runoff in Humid Tropical Forest in Sumatra, Indonesia
3. 学会等名 JASTIP-WP4 Seminar on Hydrometeorological Disasters in Humid Tropics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Apip, Kaoru Takara
2. 発表標題 Impacts of Landuse and Climate Changes on Hydrology in a Tropical River Basin, Sumatra, Indonesia
3. 学会等名 The 5th JASTIP Symposium - Disaster Risk Reduction & Environmental Sustainability for Social Resilience - (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Apip, Kaoru Takara
2. 発表標題 Climate and Land Cover Changes on Flooding in a Humid Tropic River Basin in Sumatra, Indonesia
3. 学会等名 第37回自然災害学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Karlina, Kaoru Takara
2. 発表標題 Field Studies in Asia and Pacific, Impacts of Land Use and Climate Changes on Water Cycle and Flood Disasters in the Batanghari River Basin in Sumatra, Indonesia
3. 学会等名 International Symposium on Utilization of Field Sites in Research and Education (FREE2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Karlina, Apip, Luki Subehi, Kaoru Takara
2. 発表標題 Rainfall-Runoff-Inundation Simulation for Basin-wide Flood Hazard Mapping at the Batanghari River in Sumatra, Indonesia
3. 学会等名 UNESCO-JASTIP Joint Symposium on Intra-Regional Water Security and Disaster Management (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Karlina, Apip, Luki Subehi, Kaoru Takara
2. 発表標題 Hydrologic Process Understanding and Modeling in the Batanghari River Basin, Sumatra, Indonesia
3. 学会等名 JASTIP-Net Workshop on Indonesian Proposals for Disaster Prevention (WP4) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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
研究 分担者	小杉 賢一郎 (Kosugi Ken'Ichiro) (30263130)	京都大学・農学研究科・教授 (14301)	
研究 分担者	賣 馨 (Takara Kaoru) (80144327)	京都大学・総合生存学館・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------