

令和 5 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K05741

研究課題名（和文）豪雨時の山地河川における洪水の実態把握と予測精度向上

研究課題名（英文）Understanding of flood conditions in mountain rivers during heavy rainfall for the improvement of prediction accuracy.

研究代表者

浅野 友子（Asano, Yuko）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・講師

研究者番号：80376566

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：山地域に豪雨があると、これまでの流出モデルでは予測が難しい、極端に大きな水位上昇やそれにとまなう土砂流出が生じるが、極端洪水は観測が困難で実態把握や現象解明が進んでいない。本研究では観測による実態把握に基づき流出予測精度の向上をめざす。豪雨時の観測から、斜面の応答速度は早く、流域のピーク遅れは主に河川流下過程で生じることが明らかになった。さらに、透水性のある堆積岩を基岩とする大起伏な山地流域では、平水時も洪水時も基岩からの水が主な河川水の起源であること、豪雨時には河川水の主な起源が基岩中のさらに深い部分にシフトすること、基岩を含む斜面の応答速度もかなり早いことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

豪雨時の極端洪水は、観測が困難で現象解明が進んでいないため、小規模出水時の観測に基づく限られた情報を基に流出予測が行われてきた。流出遅れは主に斜面における表土中の水移動で生じていると考えられてきたが、本研究では大規模出水時の観測から、流出ピーク遅れは斜面ではなく主に河道で生じていること、斜面の地中の流れは基岩の透水特性により、表土中と基岩中の両方で生じている場合があり、湿潤条件下ではいずれもかなり早いことが明らかとなった。気候変動下においては、これまで経験したことのない豪雨に対する予測を行う必要があり、本研究で得た実態を予測モデルに組み込むことにより、豪雨時流出の予測精度向上が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Extreme floods during heavy rainfall events are difficult to observe and their phenomena have not been fully elucidated, so runoff prediction has been based on limited information obtained from observations during small- to medium-scale runoff events. However, observations of large runoff events in this study revealed that the peak delay in runoff occurs mainly in the river channel, not on the slope, and that the subsurface flow on the slope may occur both in the surface soil and in the base rock depending on the permeability characteristics of the bedrock. Under very wet conditions, flow processes both in soil and bedrock are quite rapid. Under climate change condition, it is necessary to make predictions for heavy rainfall that has never been experienced before, and incorporating the actual conditions obtained in this study into prediction models is expected to improve the prediction accuracy of runoff during heavy rainfall.

研究分野：森林水文学、砂防学

キーワード：極端洪水 基岩中の水の流れ 基岩の透水性 トレーサ 斜面 河道 流域の規模 付加体堆積岩

1. 研究開始当初の背景

山地域に豪雨があると、これまでの流出モデルでは予測が難しい、鉄砲水や土石流と呼ばれる極端に大きな水位上昇やそれともなう土砂流出が生じるが、この極端洪水は、観測が困難で実態把握や現象解明が進んでいない。これまでの理解は主に小・中規模の洪水時の観測結果に基づいていたため、豪雨時にどのような現象が起こっているのかわからない中で、予測を行わざるを得なかった。そのため現状では、たとえ豪雨予測ができたとしても、いつでもどこでも河川の水位や流量が増加するのか正確に予測できない状況がある。

2. 研究の目的

本研究では、現地観測により、豪雨時の山地河川での極端な洪水現象の実態を把握し、実態に基づいて豪雨時の水位や流量の予測精度向上をめざす。流域の湿潤度に依存する斜面の応答速度の実態解明と、水位・流量と河道抵抗の関係の解明を行い、定式化し、予測モデルへの組み込むことを目的としている。

3. 研究の方法

観測は、東京大学樹芸研究所青野研究林（静岡県南伊豆町）及び、秩父演習林川又流域（埼玉県秩父市）で行った。青野研究林は標高 100 ~ 545 m、主として新第三紀の石英安山岩からなる小起伏山地で、暖温帯の照葉樹林帯にある。川又流域は標高 628 ~ 2475 m で、主に中生代の堆積岩からなる大起伏山地にあり、山地帯と亜高山帯林からなる。

それぞれの流域内の 10 カ所以上に水位計を設置し 1 ~ 5 分間隔で水位を観測し、降雨ピークに対する流出ピーク遅れ時間を観測した。レーザー測量等によって得られた数値標高モデルを用いて地形解析を行い、斜面長、河道長、斜面勾配、河道勾配などを計算した。これらの地形指標とピーク遅れ時間を比較した。平時に 10 カ所以上で比流量を観測し、流域面積等と比較した。降水量と、流域内の 2 ~ 3 カ所で量水堰堤を用いた流量観測を行い、ピーク時の流量や直接流出量を比較した。レーダ雨量計による雨量を用いて複数流域で水収支を計算・比較し、基岩へしみ込んで出てこない量を推定した。降水や河川水の水安定同位体比、 SiO_2 濃度などトレーサ濃度を観測し流出水の起源を推定した。地温や河川水温を観測し、流出水の起源の深さを推定した。

4. 研究成果

4.1 斜面の応答速度の実態解明：豪雨時の流出ピーク遅れは主に河道の流下過程に由来する。

これまで、流域面積が小さい山地流域では、斜面での地中の水移動が、河道の開水路の流れによる水移動に比べ、より時間がかかり、流域からの流出に大きな影響を与える、と考えられてきた（例えば石原・高棹 1964）。青野研究林で大雨時のピーク遅れ時間と、斜面や河道の長さ、斜面や河道の勾配の関係を調べたところ、図 - 1 に示すように、河道長の最頻値とピーク到達時間の間に直線的な関係があり、切片が 0 に近いことが明らかになった。これは、大雨時は河道長が 0 m、つまり斜面でのピーク遅れ時間はとても小さく、流域のピーク遅れ時間は主に河道の流れで生じることを示す。3 年間観測を行い比較的降水量・降雨強度の大きい 20 の降雨を抽出したところ、14 の降雨で図-1 と同様の直線的な関係があった。これまで主に中小規模降雨時の観測等に基づいていたと思われる、地中の水移動により時間がかかるという理解は、大雨時には当てはまらないことが明らかになった（Asano et al 2019）。

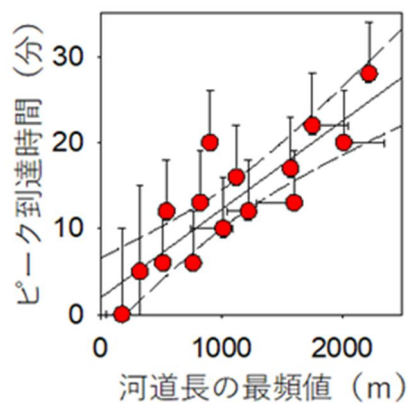


図-1 年一度程度起こる大雨時の河道長とピーク到達時間の直線的な関係

4.2 思いのほか早かった斜面の応答速度

図-1 の直線の切片から斜面のピーク遅れ時間とピーク伝播速度を、傾きから河道でのピーク伝播速度を求めたところ、斜面のピーク遅れ時間は 1 ~ 23 分、斜面でのピーク伝播速度は 10^{-3} ~ 4.3 m/s、河道でのピーク伝播速度は 0.6 ~ 2.9 m/s と計算された。斜面でのピーク遅れ時間は数分以内と非常に短い場合があり、大雨時に斜面が十分に湿潤な状態になると、斜面での洪水伝播速度が急激に速くなり、斜面間の時間差も小さくなるため、雨水は素早く、かつ、一斉に川に流れ出すようになると考えられる。また、観測した降雨における、斜面のピーク伝播速度の変化の幅は 3 オーダーと大きいものに対して、河道のピーク伝播速度の変化の幅は 1 オーダー程度で、斜面の応答速度は流域の湿潤状態や降雨条件によって大きく変化することがわかった。

4.3 透水性がある基岩からなる大起伏山地での降雨-流出

一方で、透水性がある基岩からなる大起伏山地にある川又流域で、平水時に $0.05 \sim 94 \text{ km}^2$ の流域で比流量を観測したところ、流域面積が大きくなるにつれて比流量が 3 倍以上大きくなった。このことから、このような山地では、斜面や小流域で基岩にしみ込んだ水が下流の大きな流域で流出する基岩中の経路が、降雨-流出や流域の水貯留において大きな影響を持つことがわかった (Asano et al., 2020)。

4.4 透水性がある基岩からなる大起伏山地では、平水時も洪水時も河川水は基岩から来ている

川又流域内の量水観測を行っている 3 つの流域 (0.51 km^2 , 2.2 km^2 , 94 km^2) において、降雨の空間分布も考慮した上で、流域からの比流量 (単位面積あたりの流量) や単位面積あたりの直接流出量を比較した。そうしたところ、まとまった流出のある降雨時には、流域面積の大きい流域では、小さい流域に比べ、比流量や、単位面積あたりの直接流出量が数倍 \sim 1 桁以上大きい傾向があった。このことから、斜面や小流域で基岩中に入った水が下流の大きな流域で流出する経路は、平水時のみでなく、洪水時にも卓越することが示された (Asano et al., 2022)。

また、 0.51 km^2 の流域での水温等の観測から、平水時の流出水は表土層より深い基岩中から来ていること、大雨時には、基岩のより深いところからの水の寄与が増加することなどがわかってきた。

以上の結果は、透水性のある基岩からなる大起伏山地では、地表を流れている水は平水時も洪水時も基岩中にいったん貯留されていたものが流出してきていることを示唆している。

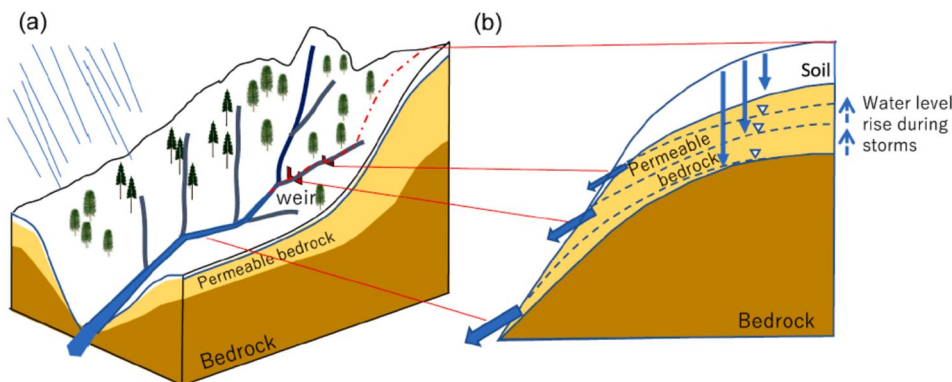


図-2 透水性のある基岩からなる大起伏山地における、降雨時の表土と基岩における水移動の模式図。表土の下には亀裂が多く透水性のある風化基岩があり、水の貯留に寄与していると考えている。(a) 3次元での表現、(b)断面図。(Asano et al., 2022)

4.4 標高の高い山岳地域での水収支の実態解明

当初の計画にはなかったが、標高の高い山岳地域での水収支が明らかになった。降水量のうち、河川に流出することなく、蒸発散で直接大気に戻る水の量を知るために、基岩への漏れている量が最も少ないと考えられる 94 km^2 の流域の水収支を求めたところ、年降水量 $1,747 \pm 245 \text{ mm/y}$ 、年流出量 $1,375 \pm 220 \text{ mm/y}$ 、年損失量が $372 \pm 78 \text{ mm/y}$ であった。年損失量はほぼ年蒸発散量に等しいとすると、川又流域の年蒸発散量は、同じ関東地方の標高の低い流域と比べて数百ミリ小さいこと、また緯度の高い北海道や東北地方にある冷温帯林や亜寒帯林からなる流域と同程度であることが示された (浅野・鈴木 2021)。この結果に基づき、 0.51 km^2 の小流域での水収支を計算すると、降水量のおよそ半分が、基岩中に漏れていることが明らかになった。

4.5 今後の課題：豪雨時の極端洪水の実態把握の難しさ

豪雨時の極端現象の把握を目指し、できる限りの備えをしていたが、観測期間中に遭遇した数十年に一度の台風による豪雨時には土石流が発生するなどして量水堰堤が 2m の土砂に埋もれるなど、データ取得は非常に困難であった。しかし、毎年 \sim 2 \sim 3 年に一度の大雨時のデータが得られ、現象理解が進んだ。気候変動による気象災害の激甚化に対応するためには、経験したことのない大雨時の水の流れの予測精度を向上させる必要があり、まずはかるうじて観測が可能な年 1 度 \sim 数年に一度はあるような大雨時の観測データを蓄積し、現象を解明し、実態を予測モデルに反映させていくことが課題であると考えている。

参考文献

石原藤次郎, 高棹琢馬 (1964): 洪水流出過程の変換系について, 京都大学防災研究所年報, Vol. 7, p. 265-279

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 UCHIDA Taro, ASANO Yuko, HIRAOKA Marino, YOKOO Yoshiyuki, GOMI Takashi, MIZUGAKI Shigeru, NIWA Satoshi, KATSUYAMA Masanori	4. 巻 34
2. 論文標題 Effects of Spatial Scales on Runoff/Sediment Transport in Mountain Catchments (4): Avenues for Prediction Improvement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF JAPAN SOCIETY OF HYDROLOGY AND WATER RESOURCES	6. 最初と最後の頁 192 ~ 204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3178/jjshwr.34.192	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 浅野友子、鈴木智之	4. 巻 103
2. 論文標題 秩父山地の山地帯林と亜高山帯林からなる流域における水収支 - 1kmメッシュ解析雨量の精度検証と流域平均降水量の算出 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本森林学会誌	6. 最初と最後の頁 145 ~ 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4005/jjfs.103.145	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 Asano Yuko, Suzuki Satoshi, Kawasaki Masatoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Peak discharges per unit area increase with catchment area in a high-relief mountains with permeable sedimentary bedrock	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 127876 ~ 127876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydrol.2022.127876	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 Asano Yuko, Kawasaki Masatoshi, Saito Toshihiro, Haraguchi Ryusei, Takatoku Kae, Saiki Michio, Kimura Kota	4. 巻 56
2. 論文標題 An Increase in Specific Discharge With Catchment Area Implies That Bedrock Infiltration Feeds Large Rather Than Small Mountain Headwater Streams	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019WR025658	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 Taro Uchida , Yuki Nishiguchi, Brian W. McArdeIl, Yoshifumi Satofuka	4. 巻 58
2. 論文標題 The role of the phase shift of fine particles on debris flow behavior: an numerical simulation for a debris flow in Illgraben, Switzerland	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Canadian Geotechnical Journal	6. 最初と最後の頁 23 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1139/cgj-2019-0452	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 内田太郎、浅野友子、水垣滋、横尾善之、丹羽論、五味高志、勝山正則、平岡真合乃	4. 巻 34
2. 論文標題 山地流域の水・土砂流出における空間スケールの影響(4)：水・土砂流出予測精度向上に向けた提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 水文・水資源学会誌	6. 最初と最後の頁 245-257
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Asano Yuko、Uchida Taro、Tomomura Mitsuhide	4. 巻 56
2. 論文標題 A Novel Method of Quantifying Catchment Wide Average Peak Propagation Speed in Hillslopes: Fast Hillslope Responses are Detected During Annual Floods in a Steep Humid Catchment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019WR025070	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 浅野友子、内田太郎、西口幸希	4. 巻 70
2. 論文標題 山地河川における洪水時の河道抵抗の実態	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 砂防学会誌	6. 最初と最後の頁 12-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11475/sabo.70.6_12	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 Asano Y. and Uchida T.	4. 巻 32
2. 論文標題 The roles of channels and hillslopes in rainfall-runoff lag times during intense storms in a steep catchment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 713-728
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/hyp.11443	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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 浅野友子、川崎雅俊、高德佳絵
2. 発表標題 秩父山地の堆積岩からなるバケモノ沢における降雨 流出特性
3. 学会等名 日本森林学会133回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野 友子、内田 太郎、友村 光秀、三浦 直子
2. 発表標題 山地流域の斜面と河道での洪水流出
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羽鹿 孝文、内田 太郎、山川 陽祐
2. 発表標題 大起伏山地の降雨流出特性の空間分布
3. 学会等名 2021年 水文・水資源学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Asano Y., Uchida T., Gomi T., Mizugaki S. Hiraoka M., Katsuyama, M. Niwa, S., Yokoo, Y.
2. 発表標題 Effect of spatial scales on runoff / sediment transport in mountain catchments
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野友子・内田太郎・友村光秀
2. 発表標題 大起伏山地の流域における斜面と河道のピーク伝播速度
3. 学会等名 日本森林学会132回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野友子・川崎雅俊・齋藤俊浩・原口竜成・高德佳絵・才木道雄・木村恒太
2. 発表標題 山地流域における平水時比流量の空間分布と貯留・流出経路の関係
3. 学会等名 第131回日本森林学会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 浅野友子・川崎雅俊・高德佳絵・才木道雄・原口竜成・齋藤俊浩
2. 発表標題 流域のスケールと水流出の関係 - 奥秩父山地荒川源流域での観測結果 -
3. 学会等名 第129回日本森林学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦直子・浅野友子
2. 発表標題 地上型グリーンレーザを用いた山地河川の河床変動の把握
3. 学会等名 砂防学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Asano Y. Uchida T, and Tomomura M.
2. 発表標題 All the Hillslopes Respond Quickly During 1 or 2 times a Year Storms in a Steep Headwater Catchment Under Humid Temperate Climate
3. 学会等名 2018 Fall Meeting, AGU, Washington, D.C.
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板井大作・友村光秀・内田太郎・松本直樹
2. 発表標題 山地河川の流出形態・流出場を考慮したCCTV等映像データによる流出解析
3. 学会等名 砂防学会研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 一般社団法人 日本森林学会編	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 704
3. 書名 森林学の百科事典	

1. 著者名 公益社団法人砂防学会編	4. 発行年 2022年
2. 出版社 公益社団法人砂防学会編	5. 総ページ数 158
3. 書名 砂防の観測の現場を訪ねて3、水の動きの不思議	

〔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	内田 太郎 (Uchida Taro) (60370780)	筑波大学・生命環境系・教授 (12102)	

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
---------	---------