

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：11601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02249

研究課題名（和文）降雨流出過程の逆推定法を活用した中小河川水位の常時高精度予測手法の開発

研究課題名（英文）Accurate and continual water-level prediction in small rivers using inverse estimation method of rainfall-runoff processes

研究代表者

横尾 善之（YOKOO, Yoshiyuki）

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：90398503

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、研究代表者が開発した「降雨流出過程の逆推定・モデリング法」を活用して中小河川水位の常時高精度予測手法を開発することを目的として実施した。これに向けて、まず観測降水量から有効降雨量を推定する複数の「地表面モデル」を開発した。その結果、Curve Number法に基づく方法が適切であることが判明した。この「地表面モデル」と「降雨流出過程の逆推定・モデリング法」を組み合わせた降雨流出モデルと仮想の水位流量曲線を併用することにより、中小河川の水位を推定する一連の手法が完成した。しかし、複数の実流域において水位の推定精度を検証した結果、推定精度をさらに向上させる必要があることが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、観測網が脆弱な中小河川における水位の常時高精度予測につながる多くの知見を得た。当初、「降雨流出過程の逆推定・モデリング法」を使うことで簡単に水位の常時高精度予測が可能と考えていたものの、それには「地表面モデル」による有効降雨量の常時高精度予測が必要になることが新たに判明した。ここに本研究の学術的意義がある。今後、この「地表面モデル」を改良することで、水位予測精度は改善できると期待できる。水位予測精度が大きく改善すれば、日本全国の中小河川の常時高精度予測が可能になり、水害の軽減や河川の維持管理コストの削減が期待できる点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The present study aimed to develop a methodology for the continuous and accurate prediction of water levels in small river watersheds using the "inverse estimation and modeling method for rainfall-runoff processes" developed by the principal investigator. First, we developed several "land surface models" to estimate effective rainfall from observed rainfall. As a result, we found that the method based on the "Curve Number method" was the most appropriate among them. By using the rainfall-runoff model that consists of the "land surface model" and the rainfall-runoff model based on the "inverse estimation and modeling method of rainfall-runoff processes" together with a virtual water-level-discharge rating curve, we could develop a series of methods for estimating water levels in small river watersheds. However, we found that the accuracy of the estimated water level in several actual river watersheds were unsatisfactory, and it needs further improvements.

研究分野：水文学

キーワード：水位流量曲線 モデリング 地表面モデル 河川流量 降水量 有効降雨

## 1. 研究開始当初の背景

中小河川の水位予測の必要性は年々増加している。2018年の西日本豪雨による岡山県高梁川水系小田川の堤防決壊や2019年の台風19号による福島県阿武隈川水系の支流群の堤防決壊による被害は、本川に加えて支川の水位予測とそれに基づく避難誘導の重要性を炙り出した。しかし、支川となる中小河川の水位を予測する場合、(1)水位・流量観測を数多く行って水位流量曲線を作成、(2)水位流量曲線に過去の水位データを入力して流量データを作成、(3)作成した流量データを使用して降雨流出モデルを構築、(4)降雨流出モデルに降水量予測値を入力して流量予測、(5)水位流量曲線を使って降水量予測値から水位予測、とする方法が一般的である。しかし、水位データさえあれば、仮想の水位流量曲線を使って求めた仮想流量と降水量データを用いて構築した降雨流出モデルに降水量予測値を入力して仮想流量を予測すれば、仮想水位流量曲線を使った水位が予測可能となる。これを実現するには仮想流量データを忠実に再現できる降雨流出モデルが不可欠である。しかし、モデル構造を事前に仮定する従来の降雨流出モデリング手法では、予測精度が次第に低下するという問題を避けることができない。

一般に、降雨流出モデルの構造は事前に決定し、モデルパラメータはキャリブレーションによって決定するため、モデルの構造とパラメータの不確実性が問題となっていた。この問題を解決するため、研究代表者は毎時の降水量と河川流量の変動特性を最大限に利用することによって上述の問題を解決した「主要な降雨流出過程の逆推定・モデリング手法」を独自開発した(Yokoo et al., 2017)。この「主要な降雨流出過程の逆推定・モデリング手法」を利用すれば、観測水位から作成した仮想流量データを忠実に再現できる降雨流出モデルが構築できる可能性が高い。

しかしながら、「主要な降雨流出過程の逆推定・モデリング手法」がどの程度、流域の主要な降雨流出過程を逆推定・モデリングできているか、詳細な検証は未だ行われていない。そこで、降雨流出過程に関する観測研究で多くの実績がある京都大学の水文試験流域の観測データや科学的知見を利用して、「主要な降雨流出過程の逆推定・モデリング手法」を検証できれば、本手法の信頼性が格段に向上するものと期待できる。このような研究を展開することで、降雨流出過程に関する観測研究とモデリング研究を融合させることができる可能性もある。

## 2. 研究の目的

本研究は、中小河川の水位を常時高精度に予測し、流域の治水・利水に直接的に貢献できる技術を開発することを目的としている。これに向けて、(1)降水量・水位データを用いた流域内の主要な降雨流出過程の逆推定・モデリング手法の確立、(2)試験流域における本手法の妥当性の検証、(3)実流域における水位予測精度の実証試験の合計3点に取り組む。これらの研究を通じて、降雨流出過程に関する観測研究とモデリング研究の融合を目指す。さらに本研究は、降水量と河川水位データのみから河川水位を常時高精度に予測する技術を開発することにより、人手も財源も情報も乏しい地方自治体に洪水時も渇水時も常時高精度な水位予測情報を提供することにより、学術的成果の社会還元を目指す。

## 3. 研究の方法

2020年度は、水位予測手法の開発と試験流域のデータ準備に取り組んだ。具体的には、一連の水位予測手法を以下の手順で開発した。(1)福島県浜通り地方の宇多川・新田川・夏井川の過去の水位データに仮想水位流量曲線を当てはめて各河川の仮想流量データを作成する。(2)降水量・仮想流量データと「主要な降雨流出過程の逆推定・モデリング手法」によって降雨流出モデルを作成し、仮想流量データを再現する。(3)仮想流量データを仮想水位流量曲線に入力して、過去の水位の再現計算を行う。以上により、3河川の水位推定精度を確認した。その一方で、京都大学の桐生試験流域の降水量・水位データを整理した。

2021年度は、桐生試験流域における水位予測手法の妥当性の検証に取り組んだ。具体的には、主要流出成分数・成分構成比・平均滞留時間・逓減時定数の推定値を比較し、それらの推定精度を検証する。結果が一致しない場合はその原因を検討し、適用限界を明確にする。

2022年度は、実流域における水位予測手法の妥当性と推定精度の検証を行った。具体的には、水位観測されている福島県浜通り地方の中小河川流域を対象として開発・検証した河川水位予測手法の妥当性および推定精度の検証を行った。

## 4. 研究成果

2020年度は、「主要な降雨流出過程の逆推定・モデリング手法」を利用して、福島県浜通り地方の宇多川・新田川・夏井川の各流域における主要な降雨流出過程の逆推定を行った。その結果、宇田川・新田川・夏井川の主要な降雨流出過程の逆推定とそのモデリングはいずれの流域でも成

功し、高精度で観測流量を推定・再現することができた（早野・横尾，2021）。なお、本手法は実際の降水量のうち、最終的に河川に流出することになる有効降雨量を推定できるが、その有効降雨量を観測降水量から高精度に推定する手法を開発する必要があることが判明した。また、京都大学の桐生水文試験地の50年の歴史に関する情報をまとめた論文を発表した（Katsuyama et al. 2021）。

2021年度は、「主要な降雨流出過程の逆推定・モデリング手法」を利用して、宇多川・新田川・夏井川の各流域の観測水位から仮想流量を作成・モデリングし、観測水位の推定を試みた。その結果、仮想流量を利用してモデリングした場合も、観測水位を高精度に推定できることが分かったが、水位流量曲線が不適切に設定されると推定精度が大幅に低下することが分かった（佐藤・横尾，2022）。さらに、「主要な降雨流出過程の逆推定・モデリング手法」で逆推定された有効降雨量を観測降水量から推定する方法を検討した。具体的には、宇多川・新田川・夏井川の各流域に加えて桐生試験地の流域を対象として、蒸発散量を推定することによって水収支法を利用して有効降雨量を推定する手法の有効性を検討した。その結果、限られた観測データから蒸発散量を高精度に推定するのは難しく、水収支法を利用して有効降雨量を精度良く推定することは事実上、不可能であることが判明した（早野・横尾，2022）。

2022年度は、観測降水量から有効降雨量を推定する地表面モデルを構築した。具体的には、桐生水文試験地の流域に、宇多川・新田川・夏井川の各流域を加えた合計4流域において、(1)水収支法、(2)単位図法、(3)カーブナンバー法の合計3種類の地表面モデルを構築し、有効降雨量の推定精度を比較・検討した。その結果、(1)の水収支法ではやはり蒸発散量を高精度に推定することができないため高精度に有効降雨量を推定できないこと、(2)単位図法は比較的高精度に有効降雨量を推定できるが推定手法自体がやや煩雑になること、(3)カーブナンバー法は比較的簡単に有効降雨量を推定できるものの推定精度がやや落ちること、などが判明した。そこで、カーブナンバー法を使って推定した有効降雨量を「主要な降雨流出過程の逆推定・モデリング手法」で構築した降雨流出モデルに入力し、仮想流量を推定した。さらに、その仮想流量を水位流量曲線に入力して観測水位の再現精度を比較した。その結果、有効降雨量の推定精度が落ちるため、水位の推定精度が低くなるものの、出水時の水位は比較的高精度に推定できることが分かった（田崎・横尾，2023）。

以上により、観測降水量と観測水位を利用して、仮想水位流量曲線から作成した仮想流量データを用いて降雨流出モデルを構築し、そのモデルを用いて仮想流量を計算して仮想水位流量曲線を再度利用して河川水位を推定する一連の手法を開発することができた。ただし、有効降雨量を高精度に推定することが非常に困難であり、推定した河川水位の精度は高くなかった。今後は、この推定精度の向上を目指し、地表面モデルの改善に継続して取り組む予定である。

#### < 引用文献 >

- Katsuyama, M., Ohte, N., Kosugi, Y., Tani, M. (2021) The Kiryu Experimental Watershed: 50 years of rainfall runoff data for a forest catchment in central Japan, *Hydrology Processes*, 35, e14104. DOI: 10.1002/hyp.14104.
- Leong, C. and Yokoo, Y. (2022) A multiple hydrograph separation technique for identifying hydrological model structures and an interpretation of dominant process controls on flow duration curves, *Hydrological Processes*, 36, e14569. DOI: 10.1002/hyp.14569.
- Leong, C., Yokoo, Y. (2021) A step toward global scale applicability and transferability of flow duration curve studies: A flow duration curve review (2000-2020), *Journal of Hydrology*, 603, B, 126984. DOI: 10.1016/j.jhydro.2021.126984.
- Yokoo, Y., Chiba, T., Shikano, Y., Leong, C. (2017) Identifying dominant runoff mechanisms and their lumped modeling: a data-based modeling approach, *Hydrological Research Letters*, 11, 128-133. DOI: 10.3178/hrl.11.128.
- 佐藤光，横尾善之（2022）降雨流出過程の逆推定法を利用した中小河川における水位予測手法の開発，令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会，11-15。
- 田崎勝也，横尾善之（2023）降雨流出過程の逆推定法を用いた河川水位の推定手法に関する検討，令和4年度土木学会東北支部技術研究発表会，11-53。
- 早野浩一郎，横尾善之（2021）中小河川における流量推定手法および降雨流出モデリング手法の検討，令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集，11-11。
- 早野浩一郎，横尾善之（2022）降雨流出過程の逆推定法による降雨流出モデリング：地表面モデルの構築法の検討，令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集，11-13。
- 早野浩一郎，横尾善之（2022）降雨流出過程の逆推定法における地表面モデルの構築法の検討，水文・水資源学会 / 日本水文科学会 2022年度研究発表会，OP-1-02。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Leong Chris, Yokoo Yoshiyuki	4. 巻 36
2. 論文標題 A multiple hydrograph separation technique for identifying hydrological model structures and an interpretation of dominant process controls on flow duration curves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 e14569
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/hyp.14569	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 Leong C., Yokoo Y.	4. 巻 603
2. 論文標題 A step toward global-scale applicability and transferability of flow duration curve studies: A flow duration curve review (2000?2020)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 126984 - 126984
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhydrol.2021.126984	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 Katsuyama Masanori, Ohte Nobuhito, Kosugi Yoshiko, Tani Makoto	4. 巻 35
2. 論文標題 The Kiryu Experimental Watershed: 50 years of rainfall runoff data for a forest catchment in central Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 e14104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/hyp.14104	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26件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

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 A-HW33-01, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, On-line, July 14, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Uchida, T., Asano, Y., Mizugaki, S., Yokoo, Y., Hiraoka, M., Gomi, T., Niwa, S., Katsuyama, M.
2. 発表標題 Towards improving predictivity of runoff and sediment transport for mountainous catchments through measurement of spatial patterns of hydrological behaviors
3. 学会等名 A-HW33-05, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, On-line, July 14, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Leong, C., Yokoo, Y.
2. 発表標題 Understanding catchment processes and scale effect on catchment flows
3. 学会等名 A-HW33-10, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, On-line, July 14, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yokoo, Y., Sakairi, T., Leong, C.
2. 発表標題 Applying a data-based rainfall runoff modeling approach to interpret the mechanisms of decreasing spatial variability of subcatchment-specific discharge with increasing subcatchment area
3. 学会等名 A-HW33-11, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, On-line, July 14, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satou, H., Yokoo, Y., Leong, C.
2. 発表標題 Dependency of watershed-scale rainwater storage on watershed-area at the occurrence times of slope failures: a preliminary investigation in Japan
3. 学会等名 A-HW33-P03, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, On-line, July 14, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 早野浩一朗, 横尾善之
2. 発表標題 中小河川における流量推定手法および降雨流出モデリング手法の検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会, II-11
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤光, 横尾善之
2. 発表標題 降雨流出過程の逆推定法を利用した中小河川における水位予測手法の開発
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会, II-15
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂内伶菜, 横尾善之
2. 発表標題 河川の流量・水質データを用いた降雨流出過程と水質形成機構の推定
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会, II-14
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早野浩一朗, 横尾善之
2. 発表標題 降雨流出過程の逆推定法による降雨流出モデリング：地表面モデルの構築法の検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会東北支部技術研究発表会, II-13
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早野浩一朗, 横尾善之
2. 発表標題 降雨流出過程の逆推定法における地表面モデルの構築法の検討
3. 学会等名 水文・水資源学会 / 日本水文科学会2022年度研究発表会, OP-1-02
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥崎綾介, 横尾善之
2. 発表標題 降雨流出過程の逆推定法を利用した分布型降雨流出モデルのパラメータの同定法の検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会東北支部技術研究発表会, II-50
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田崎勝也, 横尾善之
2. 発表標題 降雨流出過程の逆推定法を用いた河川水位の推定手法に関する検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会東北支部技術研究発表会, II-53
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsuyama, M., Tsuruta, K., Muranaka, M., Kosugi, Y.
2. 発表標題 Stable isotope signature along hydrological processes in a temperate forest, Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 滝澤遼, 勝山正則, 申基澈, 正岡直也, 小杉賢一朗
2. 発表標題 花崗岩山地におけるストロンチウム同位体比を用いた基岩内地下水動態の解明
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋悠太郎, 勝山正則, 白井峻太, 尾坂兼一, 福島慶太郎, 大西雄二, 木庭啓介
2. 発表標題 水抽出方法の違いによる土壤中窒素安定同位体比を用いた脱窒進行程度の比較
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田夏希, 勝山正則, 糸数哲, 正岡直也, 中村公人, 小杉賢一朗
2. 発表標題 森林流域における渓流水高頻度電気伝導度データの分解によるイオン動態比較
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野晴太, 勝山正則, 小杉緑子
2. 発表標題 森林土壌の孔隙構造の違いが抽出水の水素・酸素安定同位体比に及ぼす影響
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 白井峻太, 勝山正則, 福島慶太郎, 大西雄二, 木庭啓介
2. 発表標題 森林流域における湧水・渓流水NO3-濃度形成への脱窒の影響とその地点間比較
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝山正則, 鶴田健二, 村中麻咲, 小杉緑子
2. 発表標題 -ダイヤグラムを用いた森林流域内の水移動に伴う安定同位体比変動の解析
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuyama, M., Shirai, R., Fukushima, K., Onishi, Y., Koba, K.
2. 発表標題 Effects of denitrification process on the difference in streamwater nitrate concentration between neighboring subcatchments in a temperate forest, Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野陽平, 勝山正則
2. 発表標題 塩化物イオン収支を用いた隣接小流域における深部地下水浸透量の定量化
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 勝山正則, 滝澤遼, 新長千聖, 申基澈, 正岡直也, 小杉賢一朗
2. 発表標題 山地源流域におけるストロンチウム安定同位体比を用いた基岩内地下水動態の把握 -花崗岩山地と付加体堆積岩山地の比較-
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ohte, N., Katsuyama, M., Osaka, K.
2. 発表標題 Kiryu Experimental Watershed: the temperate forest catchment under Asian monsoon climate
3. 学会等名 Frontiers in Hydrology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 峰重乃々佳, 勝山正則
2. 発表標題 熱赤外画像により特定された河道沿いの湧水分布と渓流水質水量変動の関係性
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中未涼, 勝山正則
2. 発表標題 溶出実験による風化花崗岩山地の地下水・渓流水のシリカ濃度形成機構の検討
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 島田康平, 勝山正則, 堀田紀文
2. 発表標題 森林流域における 50 年間の土砂流出量変動と近年の増加要因の推定
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 勝山正則 (共著)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 640
3. 書名 水文・水資源ハンドブック 第二版 「5.2 森林域の水文現象」「6.5 同位体・トレーサ」	

1. 著者名 勝山正則 (共著)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 256
3. 書名 森林水文学入門 「第10章 流出」	

〔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	勝山 正則  (Katsuyama Masanori)  (40425426)	京都府立大学・生命環境科学研究科・教授   (24302)	

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