

令和元年6月10日現在

機関番号：11601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06501

研究課題名(和文) 観測研究とモデル研究の融合で導く降雨流出過程のスケール問題のブレイク・スルー

研究課題名(英文) Uniting field study and modeling study for breaking through scale issues in 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・准教授

研究者番号：90398503

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は降雨流出過程の「スケール依存性」と「空間代表性」の発現過程を明らかにするため、まず、流量データに基づく主要な降雨流出過程の逆推定とモデリング手法を開発した。これを利用して日米の97流域に分布する合計148地点の毎時の河川流量データを解析し、「スケール依存性」の発現過程を調べた。その結果、流域面積の大きな大陸河川では降雨に対する応答が速い成分が消失し、河川流量が平均化されるメカニズムを明らかにすることができた。「空間代表性」の発現過程については、まだ解析中である。なお、降雨流出過程は時空間スケールよりも気候条件の影響を大きく受けていることも分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、流域面積に依存して降雨流出過程が変化する「スケール依存性」と、流域内の空間的多様性が下流では消失する「空間代表性」の発現過程を明らかにすることを目的として実施した。本研究は「空間代表性」の発現過程は明らかにしていないが、「スケール依存性」の発現過程を初めて明らかにするという、流域水文学における画期的成果を得ている。なお、「スケール依存性」の影響は集水面積が10,000km<sup>2</sup>以上の流域を境に発現することを確認したため、日本の流域の場合は「空間代表性」の問題を主に対象とすればよいことが分かる。これらの知見は、河川管理に役立てることができると思われる。

研究成果の概要(英文)：The present study investigated the physical mechanisms generating “scale dependency” and “spatial representativeness” in rainfall-runoff processes. Toward the goal, we firstly developed a methodology for identifying and modeling dominant rainfall-runoff processes based on discharge data alone. Then we applied this methodology for discharge data of 148 monitoring points in 97 watersheds in Japan and the United States. The results showed that quickest runoff process disappears only in larger continental watersheds. Although we investigated how the “spatial representativeness” appear in rainfall-runoff processes, we have not obtained any clear mechanisms behind it yet. Our additional study revealed climatic effects dominates in rainfall-runoff processes than scale effects.

研究分野：流域水文学

キーワード：逆推定 成分分離 河川流量 スケール依存性 空間代表性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 国内・国外の研究動向および本研究の位置づけ

降雨流出過程における「スケール問題」は1990年頃に広く注目されたものの、現在でも未解決のままであり、洪水・濁水・土砂災害などの実現象に関する包括的な理解を妨げている。降雨流出過程に関する「スケール問題」は、河川流量などの水文学の空間的多様性が流域面積の増加に伴って減少することを示す「空間代表性」と、時空間スケールの変化に伴って主要な降雨流出過程が変化することを示す「スケール依存性」の2つの問題に大別される。

「空間代表性」に関しては、Woods *et al.* (1995)が観測データに基づいてその存在を実証しているが、面積の増加に伴って流域の“何”が変化して空間代表性が発現するのかについては未解明のままである。

「スケール依存性」に関しては、Blöschl and Sivapalan (1995)が過去の研究事例から推定される発現様式を例示したが、これも未だ未検証の状態にある。この原因は、流域内の主要な降雨流出過程を観測データに基づいて客観的に特定する方法論が水文学が獲得できていない点にある。

### (2) これまでの研究と着想に至った経緯

研究代表者はKobayashi and Yokoo (2013)において、「降雨流出過程の逆推定法」および「流域スケールの雨水貯留量推定法」を確立した。この手法を用いると、流域面積によって変化する流域内の主要な降雨流出過程を客観的に特定することができる。このため、山地小流域から下流に向かって集水面積を徐々に増加させると、降雨流出過程の空間的多様性が平均化されて「空間代表性」が発現する様子を捉えることができる可能性がある。また、Blöschl and Sivapalan (1995)が描いた降雨流出過程の「スケール依存性」の発現様式を、Kobayashi and Yokoo (2013)の「降雨流出過程の逆推定法」で同定した主要な降雨流出過程が流域面積の変化に伴って変化するメカニズムを客観的に特定できる可能性が高い。従って、研究代表者は、Kobayashi and Yokoo (2013)の「降雨流出過程の逆推定法」を利用すれば、降雨流出過程の「スケール問題」を解決に導くことができる可能性が高いと考えている。

## 2. 研究の目的

本研究は、以下の2点に取り組む。

(1) 「スケール依存性」が発現するとされる集水面積が1km<sup>2</sup>以上の流域を対象として、流域面積の増加に伴って空間スケール依存性が発現して主要な降雨流出過程が変化するメカニズムを明らかにする。

(2) 「空間代表性」が発現するとされる集水面積が1km<sup>2</sup>以下の流域を対象として、「空間代表性」の発現過程を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) 「スケール依存性」の発現過程

「スケール依存性」の発現過程については、集水面積1km<sup>2</sup>以上の流域を対象として、まず日米の河川流量の観測値を収集する。次に、収集した河川流量データの観測値をKobayashi and Yokoo (2013)の「降雨流出過程の逆推定法」によって流域内の主要な降雨流出過程の数と各過程における貯留・流出・浸透機構を同定する。さらに、同定された流域内の主要な貯留・流出・浸透機構が流域面積の増加に伴って変化するメカニズムを明らかにする。

### (2) 「空間代表性」の発現過程

「空間代表性」の発現過程については、仮想流域内の小流域群を対象とした降雨流出過程の数値シミュレーションを行うことで検討する。集水面積が1km<sup>2</sup>流域内に小流域を設けて流量観測をしている流域は研究機関が所有する試験流域でも希であり、時間単位で観測されているデータの公開もされていない。このため、実測データだけを利用した研究の実施は難しい。そこで、1km<sup>2</sup>以下の仮想流域内に小流域群を作成し、降雨流出過程の数値シミュレーションを併用することでこの問題に対処する。小流域群は入れ子状に配置して数値シミュレーションを行い、流域面積の増加に伴って降雨流出過程の「空間代表性」が発現するメカニズムを明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 研究の主な成果

「スケール依存性」に関する成果

降雨流出過程の「スケール依存性」の発現過程を調べるため、まずKobayashi and Yokoo (2013)の「降雨流出過程の逆推定法」を発展させた、集中型のモデル構築法を開発した(Yokoo *et al.*, 2017)。これにより、毎時の河川流量データから流域内の主要な降雨流出過程を客観的に同定し、その降雨流出過程のモデルの構造とパラメータまで一意に同定する方法論が完成した。

この手法を応用して、日本およびアメリカの流域の毎時の観測流量データを利用して、主要な降雨流出過程の同定とモデリングを行った(本田・横尾, 2018; 横山・横尾, 2019)。その結果、流域面積の増大に伴って、降雨に対する応答が速い成分が消失することにより、主要なプロセスの減少とその結果としての流量の時間的変化の平均化傾向が発現することが分かった。これに

より、降雨流出過程には「スケール依存性」が実在することを世界で初めて明らかにした。

#### 「空間代表性」に関する成果

降雨流出過程の「空間代表性」の発現過程については、集水面積が 10km<sup>2</sup> 以下の流域を対象としてデータを収集し、Kobayashi and Yokoo (2013)および Yokoo *et al.* (2017)の手法で主要な降雨流出過程の逆推定とモデリングを行った。その結果、集水面積が拡大して 1km<sup>2</sup> に近づくとつれて個々の主要な降雨流出過程を経て流出する成分が一定値に向かって集約する傾向の一端を確認することができた。しかし、対象流域数が 6 流域だけであったため、この結果だけでは「空間代表性」の発現メカニズムに迫ることができなかった(横山・横尾, 2019)。

そこで、仮想流域を対象とした検討に着手したが、まだ解析結果をまとめている段階である。このため、現段階で結果を公開できる段階に達していない。

#### 気候条件が異なる流域の降雨流出過程に関する成果

本研究の初期段階で開発した、降雨流出データを利用した主要な降雨流出過程のモデリング手法(Yokoo *et al.*, 2019)には、当初の想定以上に、非常に多くの応用例が期待できることが研究中に判明した。そこで、この手法を利用して、流域面積や気候条件が大きく異なる流域における主要な降雨流出過程の同定に関する研究に試験的に応用した。その結果、同一の気候条件下では降雨流出過程のスケール問題は降雨流出過程を理解する上で重要な問題であるが、気候条件が大きく異なる場合には気候条件がスケール問題よりも降雨流出過程に対して支配的になることが分かった(Leong and Yokoo, 2017; Leong and Yokoo, 2019)。

### (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究が取り組んだ降雨流出過程の「スケール依存性」と「空間代表性」の発現メカニズムに包括的に迫る研究は未だ本研究を除いて存在しない。本研究がこれに取り組むことができたのは、独自に開発した「降雨流出過程の逆推定法」およびそれを利用したモデリング手法を開発することができたためと言える。したがって、本研究で得られた知見の独自性は極めて高いと位置付けることができる。また、このような状況から、本研究で得られた知見の水文学におけるインパクトは非常に大きいものと言える。

### (3) 今後の展望

本研究により、降雨流出過程の「スケール依存性」については、その存在を実証することができた。「空間代表性」についてはまだ解析中である。両者の結果は、早急に論文として取りまとめる予定である。

今後は得られた知見が世界のどこでも確認できるのか、また、気候条件と時空間スケールが降雨流出過程に与える影響はどのような関係性にあるのかについて、整理していく必要があると考えられる。

#### <引用文献>

- Blöschl, G., Sivapalan, M. (1995) Scale issues in hydrological modelling: A review, *Hydrological Processes*, 9, 251-290. DOI:10.1002/hyp.3360090305.
- Kobayashi, S., Yokoo, Y. (2013) Estimating watershed-scale storage changes from hourly discharge data in mountainous humid watersheds: toward a new way of dominant process modeling, *Hydrological Research Letters*, 7, 97-103. DOI: 10.3178/hrl.7.97.
- Leong, C., Yokoo, Y. (2017) Estimating flow duration curve in the humid tropics: a disaggregation approach in Hawaiian watersheds, *Hydrological Research Letters*, 11, 175-180. DOI: 10.3178/hrl.11.175.
- Leong, C., Yokoo, Y. (2019) Estimating flow duration curves in perennial and ephemeral catchments by using a disaggregated approach, *Hydrological Research Letters* (印刷中).
- Woods R, Sivapalan M, Duncan M. (1995) Investigating the representative elementary area concept: An approach based on field data, *Hydrological Processes*, 9, 291-312. DOI: 10.1002/hyp.3360090306.
- 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.
- 本田樹, 横尾善之 (2018) 降雨流出過程のスケール依存性の発生機構に関する検討, 平成 29 年度 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 11-21.
- 横山康平, 横尾善之 (2019) 降雨流出過程のスケール依存性および空間代表性に関する検討, 平成 30 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 11-50.

## 5. 主な発表論文等

#### [雑誌論文](計 7 件)

Leong, C., Yokoo, Y. (2019) Estimating flow duration curves in perennial and

ephemeral catchments by using a disaggregated approach, Hydrological Research Letters (印刷中). 査読有

横尾善之, 丹羽諭, 内田太郎, 平岡真合乃, 勝山正則, 五味高志, 水垣滋, 浅野友子 (2018) 山地流域の水・土砂流出における空間スケールの影響 (3): 数値解析モデル上の取り扱い事例, 水文・水資源学会誌, 31, 245-261. DOI: 10.3178/jjshwr.31.245. 査読有  
浅野友子, 内田太郎, 勝山正則, 平岡真合乃, 水垣滋, 五味高志, 丹羽諭, 横尾善之 (2018) 山地流域の水・土砂流出における空間スケールの影響 (2): 集中的な観測が行われた流域の事例, 水文・水資源学会誌, 31, 232-244. DOI: 10.3178/jjshwr.31.232. 査読有  
浅野友子, 内田太郎, 五味高志, 水垣滋, 平岡真合乃, 勝山正則, 丹羽諭, 横尾善之 (2018) 山地流域の水・土砂流出における空間スケールの影響 (1): 流域面積に対する水・土砂流出量の応答に関する観測例, 水文・水資源学会誌, 31, 219-231. DOI: 10.3178/jjshwr.31.219. 査読有

Leong, C., Yokoo, Y. (2017) Estimating flow duration curve in the humid tropics: a disaggregation approach in Hawaiian watersheds, Hydrological Research Letters, 11, 175-180. DOI: 10.3178/hr1.11.175. 査読有

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/hr1.11.128. 査読有

Leong, C., Yokoo, Y. (2017) Applicability of the Curve Number Method for estimating flow duration curves in the Humid Tropic, Tohoku Journal of Natural Disaster Science, 53, 107-112. 査読無

[学会発表](計 13 件)

Leong, C., Yokoo, Y.: Runoff estimations in a 3-part disaggregated flow duration curve, Proceedings of FY2018 Annual Meeting of the Tohoku Branch, Japan Society of Civil Engineers, 11-12, Sendai, Japan, March 2, 2019.

横山康平, 横尾善之: 降雨流出過程のスケール依存性および空間代表性に関する検討, 平成 30 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 11-50, 仙台, 2019/3/2.

Leong, C., Yokoo, Y.: Estimating runoff in perennial and ephemeral catchments: a disaggregated flow duration curve approach, The 6th International Symposium on Water Environment Systems, Sendai, Japan, Nov 30, 2018.

Yokoo, Y., Yoshida, K., Suzuki, K., Leong, C.: A data-based modeling of dominant rainfall-runoff mechanisms: application to snowy watershed, Asia Oceania Geoscience Society 15th Annual Meeting (AOGS 2018), Honolulu, Hawaii, USA, June 4, 2018 (Invited).

松本進, 横尾善之, 別生奈津子: 降雨流出過程の逆推定法を利用した全日本水源涵養マップの作成, 平成 29 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 日本大学工学部, 11-40, 2018/3/3.

吉田薫, 横尾善之: 降雨流出過程の逆推定法を利用した積雪・融雪機構のモデリング, 平成 29 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 日本大学工学部, 11-32, 2018/3/3.

本田樹, 横尾善之: 降雨流出過程のスケール依存性の発生機構に関する検討, 平成 29 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 日本大学工学部, 11-21, 2018/3/3.

Yokoo, Y., Leong, C.: Identifying dominant storage-runoff processes to constrain structures and parameters of rainfall-runoff models: moving from model calibration to custom-made modeling, European Geoscience Union General Assembly 2017, Vienna, Austria, April 28, 2017.

Leong, C., Yokoo, Y.: Estimating flow duration curve in the humid tropics: A disaggregation approach in Hawaiian catchments, European Geoscience Union General Assembly 2017, Vienna, Austria, April 24, 2017.

Leong, C., Yokoo, Y.: Applicability of the Curve Number Method for Estimating Flow Duration Curves in the Humid Tropics, 平成 28 年度東北地域災害科学研究集会, 陸前高田コミュニティホール, 2016/12/24.

長谷川永刀, 横尾善之: 土砂災害発生時の流域スケールの雨水貯留量のマッピング, 平成 28 年度東北地域災害科学研究集会, 陸前高田コミュニティホール, 2016/12/24.

Leong, C., Yokoo, Y.: Estimating Flow Duration Curve in the Humid Tropics: A Disaggregation Approach in Hawaiian Watersheds, Japan Society of Hydrology and Water Resources Annual Meeting 2016, Fukushima, 2016/9/16.

千葉宇彦, 横尾善之: 九州の流域における雨水貯留量推定値と流量の比較, 水文・水資源学会 2016 年度総会・研究発表会, コラッセふくしま, 2016/9/16.