

東北地方の流域における降雨流出機構のスケール依存性

福島大学共生システム理工学類 加藤 光
福島大学共生システム理工学類 横尾 善之

1. はじめに

降雨流出機構における「スケール問題」は1995年に広く注目されて以来、20年経過した現在でも未解決のままである。「スケール問題」を包括的に取りまとめた Kalma & Sivapalan (1995) は、河川流量などの水文量の空間的ばらつきが流域面積の増加と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機構が変化することを示す「空間スケール依存性」の2つで構成していると報告している。「空間代表性」に関する研究は多く存在しており、Woods *et al.* (1995) では空間代表性が発現するのは流域面積が 1 km^2 程度であるとしている。しかし、何が変化することで空間代表性が発現するのかについて未解決のままである。「空間スケール依存性」に関してはほとんど研究もされていない。本研究は河川流量の観測データのみから流域内の主要な降雨流出プロセスを特定できる成分分離手法を用いてスケールに応じて変化する降雨流出機構を客観的に把握し、空間スケール依存性の発現要因の解明を目指す。

2. 方法

2.1 対象流域および使用データ

本研究は東北地方の第一級河川 13 流域を対象としている。図-1 は対象流域の観測点を示している。流域面積の大きさを比較したいためとれる範囲で大きさが異なる流域面積の観測所を選定し、国土交通省の水文水質データベースから時間流量データ取得した。時間流量データは単位を mm h^{-1} と変換して使用した。

2.2 成分分離

本研究では、流量を日野・長谷部(1985)が提案した手法を用いて成分分離した。流量の成分分離では、まず図-2 のように片対数表示にした流量の遞減部分を傾きの異なる複数の直線部で表現した。直線の傾きが一番小さく表現された範囲の流量データを抽出し、指近似を行った。指近似で得られる式



図-1 対象流域の観測点位置

*Scale dependency of rainfall-runoff processes in the watersheds of the Tohoku region, Japan by Akira Kato and Yoshiyuki Yokoo

は式(1)のようになる。式(1)で得られた遅減係数 a の値を式(2)に代入することでその流量の遅減部分の時定数 T_c を算出した。時定数 T_c の決定の際には、菅野・横尾 (2015)を用いた。具体的には、算出した時定数 T_c を \log_5 でとり四捨五入して整数化した値が菅野・横尾 (2015)で定められた境界値 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 のどの値の間に位置するか確認してから時定数 T_c を決定した。

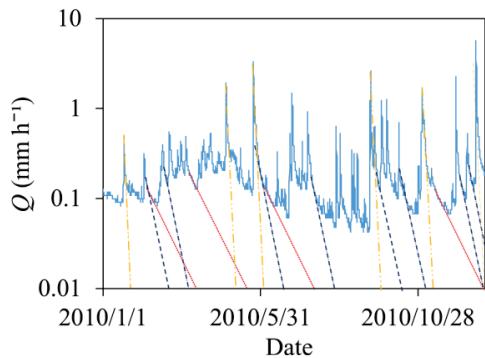


図-2 直線で表した各流量遅減部（線種の違いで遅減特性の違いを表現している）

$$Q(t) = Q_0 \exp(-at) \quad (1)$$

$$T_c = 1/a \quad (2)$$

算出した T_c を用いて式(3), (4)よりパラメータ c_0 , c_1 を求めた。

$$c_0 = (2.1/T_c)^2 \quad (3)$$

$$c_1 = 2.1^2/T_c \quad (4)$$

求めた c_0 , c_1 を式(5)に代入し数値フィルター $\omega(\tau)$ を求めた。

$$\omega(\tau) = \begin{cases} \frac{c_0}{\sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0}} \exp\left(-\frac{c_1}{2}\tau\right) \sinh\left(\tau\sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0}\right) & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases} \quad (5)$$

求めた数値フィルター $\omega(\tau)$ を式(6)に代入し流出成分 Q' を分離した。式(6)の α は重り係数であり, $0.1 \leq \alpha \leq 1$ の範囲で求めた流出成分 Q' と分離前の流量 Q が重ならないように α の値を調整した。

$$Q'(t) = \alpha \sum \omega(\tau) Q(t - \tau) \quad (6)$$

成分分離後は、全体の流量から分離して求めた流量成分を引いて算出した残流量を用いて、次に傾きが小さい遅減部分から時定数 T_c を求めて成分分離をした。なお、次の流量成分の時定数 T_c の決定する際には、同じ成分を取らないように $\log_5 T_c$ の値が前回と同じ境界値の間に位置

しないようにした。

3. 結果

対象流域の詳細は表-1に示す。本研究は表-1の13流域を菅野・横尾(2015)で定めた時定数 T_c の範囲で成分分離した。具体的には、 $\log_5 T_c$ の値の0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5を降雨流出機構の境界値と定めて、その境界値の間が降雨流出機構の各プロセスとして成分分離して、流域面積と発現する降雨流出機構の関係について比較を行った。図-3から図-6は対象流域の成分分離結果の一部であり、図-3と図-4は流域面積が小さい流域、図-5と図-6は流域面積が大きい流域である。小さい流域では5成分に分離でき、大きい流域では6成分に分離できた。図-7は各流域の発現した降雨流出機構結果である。縦軸の $\log_5 T_c$ は値が小さいほど流出が早いプロセス、値が大きいほど流出が遅いプロセスに相当する。

表-1 対象流域の詳細

流域名	観測所	流域面積(km ²)
岩木川	五所川原	1740.00
高瀬川	上野	344.20
馬淵川	櫛引橋	1858.00
北上川	諫訪前	7509.50
鳴瀬川	野田橋	707.00
名取川	湯元	130.00
雄物川	雄物川橋	1240.00
子吉川	明法	472.00
米代川	十二所	1167.40
最上川	糠野目	359.00
赤川	浜中	695.10
阿武隈川	阿久津	1865.20
阿賀野川	小谷	868.00

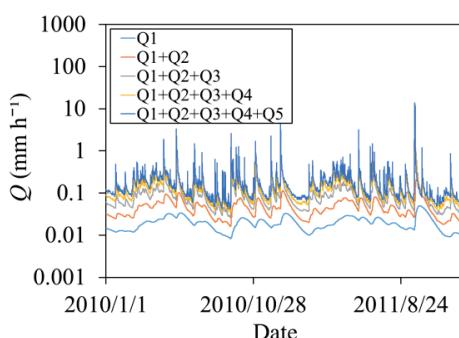


図-3 名取川の成分分離結果

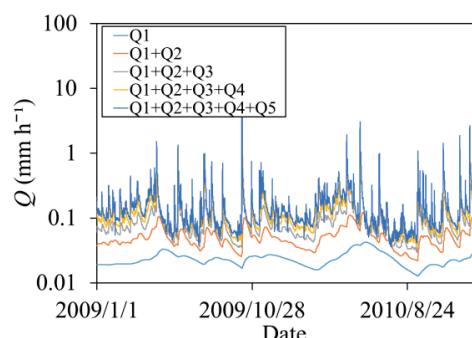


図-4 鳴瀬川の成分分離結果

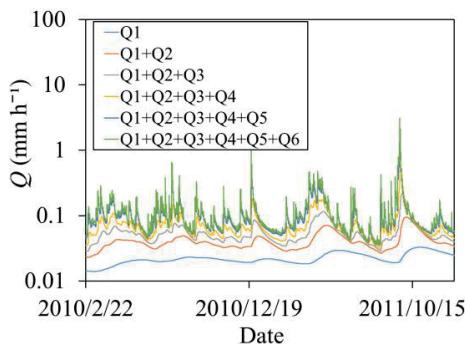


図-5 馬淵川の成分分離結果

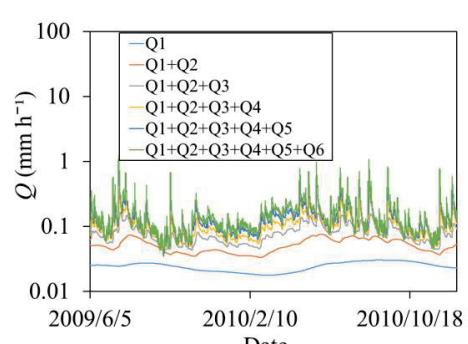


図-6 北上川の成分分離結果

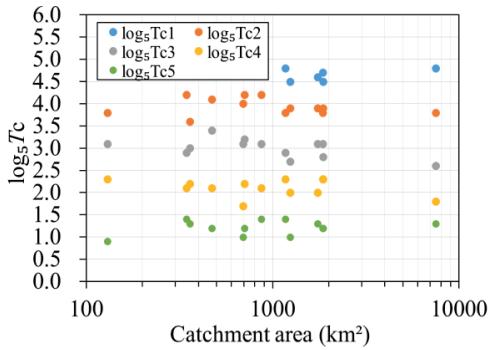


図-7 流域面積と発現するプロセス数の関係

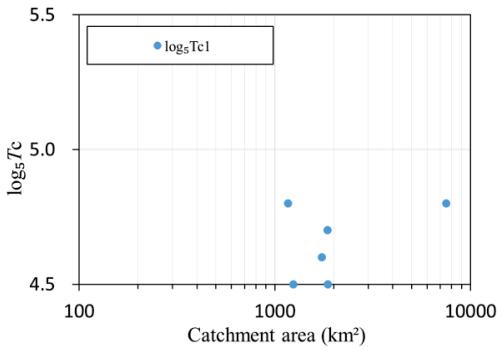
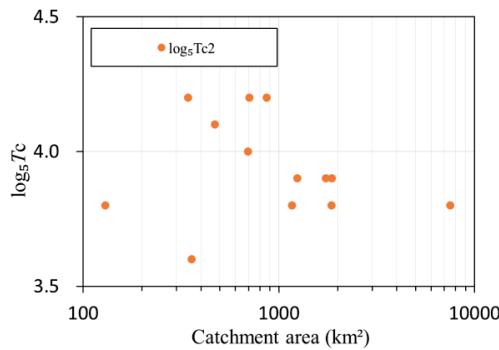
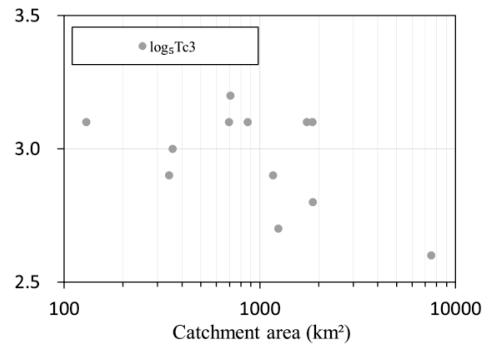
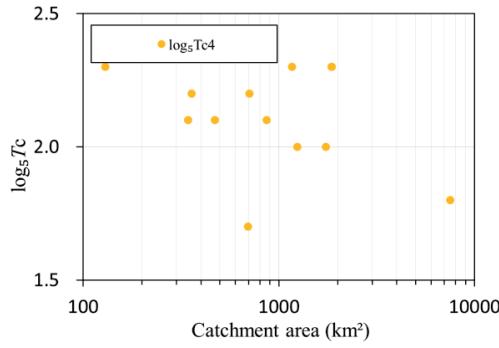
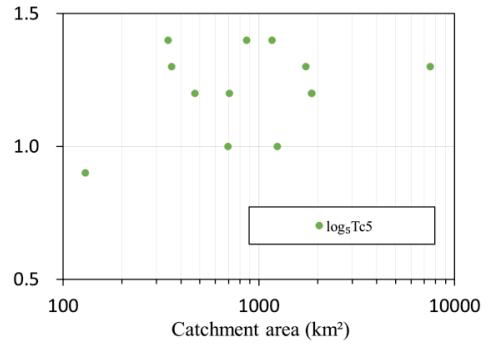
図-8 各流域の T_{c1} の値図-9 各流域の T_{c2} の値図-10 各流域の T_{c3} の値図-11 各流域の T_{c4} の値図-12 各流域の T_{c5} の値

図-7より、流域面積の増加に伴って流域内に存在するプロセス数が変化しているのがわかる。具体的には、 $\log_5 T_{c1}$ から $\log_5 T_{c4}$ の比較的速い流出プロセスは対象流域すべてに発現しているが、遅い流出プロセスである $\log_5 T_{c5}$ は流域面積が約 1000 km^2 以上の対象流域にしか発現していない。このことから、プロセス数は流域面積に依存している可能性があることがわかる。図-8から図-12は図-7の各プロセスの時定数 T_c をそれぞれ単体で見たものである。どのプロセスの T_c も

流域面積の増加に伴って値が変化している傾向は見られなかった。

4. 考察

Kalma & Sivapalan (1995)が報告した降雨流出機構における「スケール問題」についての既存研究は数多くある。例えば、Woods *et al.* (1995)は河川流量データを用いて空間代表性を検討し、代表要素面積(REA)は 1 km² 程度になると示している。他にも、Gomi *et al.* (2006)は有機物生産量を用いて、Asano & Uchida (2010)はシリカ濃度を用いて同様の報告をしている。しかし、これらの既存研究は流域面積と物質量を対象としたものばかりであり、本研究のように時空間スケールを対象にしているものは Blöschl & Sivapalan (1995)以外報告されていなく、ここに本研究の新規性があると考える。

本研究は、東北地方の第一級河川の流量データのみから主要な降雨流出機構を特定できる日野・長谷部 (1985)の成分分離を利用して空間スケール依存性の発現要因を解明に取り組んだ。成果として流域面積の増加に伴って主要な降雨流出機構のプロセス数の変化を確認することができた。日野・長谷部 (1982)では、対象流域の流出特性の相違は流域面積の違いもあるがそれ以上に流域を構成している地質地形構造の違いによるものと推察している。しかし、図-6の結果を見る限り、主要な降雨流出機構の変化には流域面積も大きな要因になっている可能性があると考える。

本研究の結果は、対象流域の面積が最小で 130 km²、最大で 7509.5 km² の間の成果である。このような結果が、流域面積 100 km² 以下及び 10000 km² 以上の流域でも同様な結果を得られれば、20 年間経過して初めて Blöschl & Sivapalan (1995)の妥当性を議論できるようになると考える。また、流域面積を決定するだけで降雨流出モデル構築に必要な主要なプロセス数やパラメータの値を決定できるようになると考える。

5. 結論

本研究は、河川流用の観測データのみから主要な降雨流出機構を逆推定できる日野・長谷部 (1985)の成分分離を利用して空間スケール依存性の発現要因を解明することを目指した。結果として流域面積の増加に伴って主要な降雨流出機構のプロセス数の変化を確認することができた。しかし、空間スケール依存性の発現要因を解明には至らなかった。今後は、本研究で解析していない流域面積の河川を解析し、同様の結果が得られるか確認したうえで、発現要因を検討する必要があると考える。

参考文献

- Blöschl, G., Grayson, R.B., and Sivapalan, M. (1995) On the representative elementary area (REA) concept and its utility for distributed rainfall-runoff modelling, *Hydrological Processes*, 9, 313-330
- Sivapalan, M. and Kalma, J.D. (1995), *Scale issues in hydrological modelling*, John Wiley and Sons, Chichester, UK, 489p.
- Gomi, T., Sidle, R.C., and Richardson, J.S. (2006) Understanding processes and downstream linkages of headwater systems, *BioScience*, 52(10), 905-916.

- Woods, R. and Sivapalan, M. (1995) Investigating the representative elementary area concept: an approach based on field data, *Hydrological Process*, 9, 291-312.
- Asano, Y. and Uchida, T. (2010) Is representative elementary area defined by a simple mixing of variable small streams in headwater catchments?, *Hydrological Processes*, 24, 666-671.
- 菅野裕嗣・横尾善之 (2015) 降雨流出過程における主要プロセス数の推定, 東北地域災害科学研究, 51, 195-200.
- 日野幹雄・長谷部正彦 (1982) フィルター分離 AR 法による非線形流出系の同定と予測 (時間単位), 土木学会論文報告書, 324/II-8, 83-94.
- 日野幹雄・長谷部正彦 (1985) 水文流出解析, 森北出版, 254p.