

## 降雨流出過程における主要プロセス数の推定\*

福島大学共生システム理工学類 菅野 裕嗣  
福島大学共生システム理工学類 横尾 善之

### 1.はじめに

降雨流出モデルは数多く提案されているが、モデル構造やモデルパラメータはモデルの解析者の試行錯誤によって決定されている場合が多く、一般に降雨流出モデルには不確実性がある。一方、Barnes (1939) は流量データを対数プロットすると、逓減部の勾配変化は2つまたは3つの直線部分からなることを示し、引けた直線の数が降雨流出プロセス数に対応していると仮定して、勾配の急な直線から順に表面流、中間流、地下水流であるとした。西山・横尾 (2013) は Barnes (1939) の手法を用いて成分分離をして解析を行った。

日野・長谷部 (1985) は Barnes (1939) の手法を利用して、片側作用フィルターによる成分分離法を提案した。その手法では観測流量から地下流出成分を引くと、表面流と中間流の和となりさらに中間流に対して同じ操作を繰り返すと、中間流出成分、そして残りとして表面流出成分がそれぞれ求まるとして示した。そのことから観測流量の逓減部分はいくつもの流出成分が重なってできている。西山・横尾 (2013) は逓減部の勾配変化はいくつかの直線部分からなることを示し、引けた直線の数が降雨流出プロセス数に対応していると仮定して成分分離を行っているが、引いた直線部分は求める流出成分とは違った成分を含んでいるので、そこから求めた時定数  $T_c$  は数学的に正確とはいえない。

そこで本研究では日野・長谷部 (1985) の手法であるフィルタ一分離法を用いて日本の第一級河川 109 水系と沖縄県の 2 水系を対象に成分分離を行い、降雨流出プロセス数を統一的に決定する手法を検討するとともに、降雨流出プロセス数の成因について考察する。フィルタ一分離法を用いることで、全体の流量から流出の遅い成分が引かれ、逓減部分を直線で表す際に求められる流出成分に近い直線を引くことができる。

### 2.方法

#### 2.1 対象流域および使用データ

本研究は日本の第一級河川 109 流域と沖縄県の 2 流域を対象としている。それぞれの流域の中で、人間活動の影響が少ないと考えられる上流部に位置していること、数年から数十年分の時間流量データが存在していることを条件に観測所を選定し、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を取得した。また西山・横尾 (2013) の成分分離結果と比較するために対象となる流域の観測所は、データが欠損している場所を除いて同じ観測所にした。時間流量データは観測所の流域面積で除し、単位を mm/h と変換して利用した。

#### 2.2 成分分離

\* Estimating the number of dominant processes in rainfall-runoff processes by Yushi Kanno and Yoshiyuki Yokoo

流量の成分分離では、まず対数表示した流量の過減部分をいくつかの直線で表現し、その直線の傾きの範囲を抽出した。そしてその抽出した範囲を Boussinesq (1904) の河川流量過減部の式(1)で表し、式(1)の過減係数  $a$  の値の逆数がその流量の過減部分の時定数  $T_c$  である。

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

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

この  $T_c$  を式(3), (4)に代入し、パラメーター  $c_0, c_1$  を求めた。

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

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

求めたパラメーター  $c_0, c_1$  を式(5)に代入し、数値フィルター  $\omega(\tau)$  を求めた。

$$\omega(\tau)=\begin{cases} c_0 \exp\left(-\frac{c_1 \tau}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{\frac{c_1^2}{4}-c_0}} \sinh\left(\tau \sqrt{\frac{c_1^2}{4}-c_0}\right) & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases} \quad (5)$$

数値フィルター  $\omega(\tau)$  を式(6)に代入し、流出成分  $Q'$  を求めた。式(6)の  $a$  は重み係数であり、 $0.1 < a < 1$  の範囲で  $Q'$  が成分分離前の流量  $Q$  に重なるように  $a$  を決定した。最も遅い流出成分を求める成分分離は残流量が負の値にならないように  $a$  の値を調整した。

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

成分分離したら、全体の流量から先に分離して求めた流出成分を引いて算出した残流量を使って、次に傾きの小さい過減から時定数  $T_c$  を求め成分分離した。

### 3. 結果

研究対象の 111 水系のうち 3 水系は流量データが欠損していたため他の 108 水系を成分分離した。図-1 は流域ごとに直線の本数を求めた結果である。Barnes (1939) は直線の本数が降雨流出プロセス数を表すと仮定していたため、横軸は降雨流出プロセス数とした。72 流域は降雨流出プロセス数が 4 つである。これは対象とした流域全体の約 7 割を占める。さらに降雨流出プロセス数は最小で 2 つ、最大で 5 つあることがわかった。

図-2 は流域ごとに算出した時定数  $T_c$  の結果である。横軸の降雨流出プロセス番号は小さいほど流出が速いプロセスに相当する。この結果から、時定数  $T_c$  は最小で 2 (h)，最大で 7692 (h) であった。この図から、縦軸を対数軸とすると時定数  $T_c$  が直線的にプロットされることがわかる。しかし、勾配の急な直線から順に番号を付けたために、同じ時定数であ

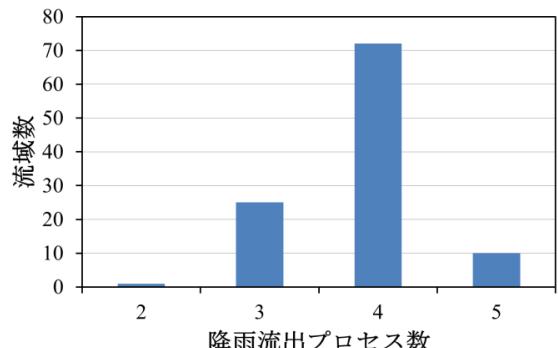


図-1 降雨流出プロセス数と対象流域数の関係

っても一方の流域では1番目のプロセスであるのに対し、他方の流域では2番目のプロセスであるなど、プロセス番号と時定数の関係が一意に決まらないことがわかる。

この結果から、降雨流出プロセスに対応するように時定数  $T_c$  の範囲が明確になれば、統一的に降雨流出プロセスを時定数  $T_c$  から決定できると考えられる。そこで著者らは、時定数  $T_c$  について底を5とした対数値 ( $\log_5 T_c$ ) とした図を作成し、縦軸の値の 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 を降雨流出プロセスの境界値と定め、その境界値の間がそれぞれ下から順に 1, 2, 3, 4, 5 と降雨流出プロセス番号に対応するとした。**図-2** より、43 水系の流域ではプロセス数は最大で5つであることから本研究では日本の降雨流出プロセス数は最大5つのプロセスに分かれると仮定して研究を進める。境界値を決める対数値は底を5としたときが算出した時定数  $T_c$  を最も均等に分けることができたので対数値は  $\log_5 T_c$  を用いて境界値を求めた。この境界値に従って**図-2** のデータをプロットし直したのが**図-3** であり、これにより降雨流出プロセスを決定できるが、この結果の正確性についてはまだ検討が必要である。

**図-4** は降雨流出プロセス番号のデータ区間を流出が速い順で 1, 2, 3, 4, 5 の5区間として流域数についてヒストグラム解析をした結果である。**図-1** の結果の降雨流出プロセス数が最大5つあったことに対応させてデータ区間を5区間とした。この結果では、プロセス5を除いてそれぞれの区間についてほぼ均等な頻度で時定数  $T_c$  が割り振られていることがわかる。しかし西山・横尾(2013)で求めた時定数  $T_c$  は、それぞれの区間についてほぼ均等な頻度で割り振られていたという違いがみられた。この結果だけでは降雨流出プロセスに関係する有意な結果であるとするかはまだ検討が必要であるが、このデー

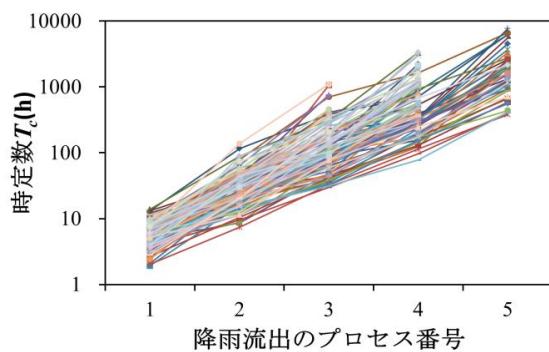


図-2 時定数  $T_c$  と降雨流出プロセスの関係

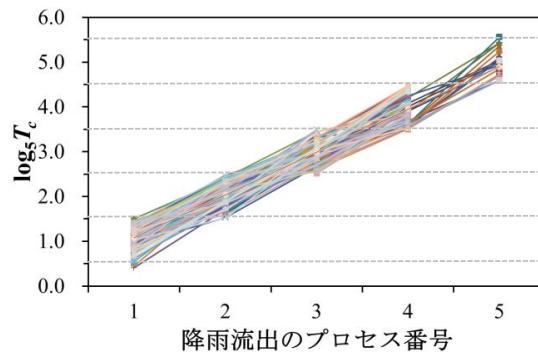


図-3  $\log_5 T_c$  と降雨流出プロセスの関係

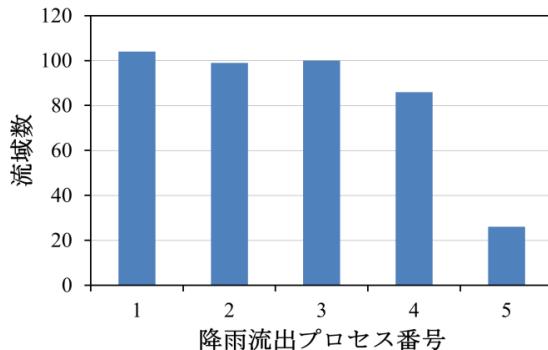


図-4 降雨流出プロセスのヒストグラム解析

タ区間が降雨流出プロセスの境界となる値に近いと考え、図-3を作成した。

図-5は、成分分離の結果から水系毎にどの段階でプロセスが抜けているのかが視覚的に分かる表である。プロセスが存在しているところに色をつけ、プロセスが存在しないところを空白にした。北海道はプロセス5がほかの地域に比べて多く、逆にプロセス1は少ない。東北は北海道に次いでプロセス5が多い。北海道、東北以外の地域ではプロセス5がほとんど確認できなかった。特に近畿はプロセス5が全て無かった。全体としてみると、必ずプロセス1から始まるわけではなく、順番通りにプロセスが進むわけでもないことがわかるが、中部や四国などプロセスがほとんど1から順に埋まっている地域も存在している。

図-5 一級河川の主要プロセスの有無

#### 4. 考察

図-1で分かった降雨流出プロセス数の最小が2つで、最大が5つであるという結果は、西山・横尾(2013)の結果とは異なる。西山・横尾(2013)は降雨流出プロセス数の最小が3つで、最大が5つである。また、時定数 $T_C$ は本研究では最小で2(h)、最大で7692(h)であったのに対し西山・横尾(2013)では最小で2.5(h)、最大で12500(h)であった。同じ観測所での成分分離でも、本研究と西山・横尾(2013)でプロセス数と時定数 $T_C$ の範囲が異なるのは、フィルタ一分離法で観測流量から分離した成分を引いてから次に流出の速い成分を求めていた本研究に対し、西山・横尾(2013)では流出成分を抽出しないで次に流出の速い成分を求めていて、そのことから、本研究は成分が抽出されるたびに遞減部の傾きが大きくなっていくので西山・横尾(2013)で求めた時定数 $T_C$ よりも小さい時定数 $T_C$ が求まるからであると思われる。

しかし、図-2 の結果から降雨流出プロセス番号と時定数  $T_C$  の関係が一意に決まらないことがわかったため、著者らは、降雨流出プロセスに対応するように時定数  $T_C$  の範囲が明確になれる

ば、統一的に降雨流出プロセスを時定数  $T_c$  から決定できると考え、図-4 の結果をもとに図-3 を考案した。これにより降雨流出プロセスを明確に決定できる可能性を見出せたが、この結果の正確性については検討が必要である。時定数  $T_c$  の範囲を定めることで降雨流出プロセスを決定するという研究事例はまだない。そのため、まずは時定数  $T_c$  と流域の気候・地質地形条件との関係性を明らかにしていくことが今後の課題である。

## 5. 結論

本研究は降雨流出プロセス数を統一的に決定する手法を検討することと、降雨流出プロセス数の成因について考察することを目的として、日野・長谷部（1982）の手法である片対数プロットの過減曲線によるフィルタ一分離法を用いた成分分離を利用して日本の第一級河川 109 流域と沖縄県の 2 流域について河川流量の成分分離を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- ① 日本の流域の降雨流出プロセス数は 3 つまたは 4 つの割合が高かったが、北海道、東北では 5 つの割合が高いことや北海道、東北以外ではプロセス 5 がほとんど確認されなかつたことなど異なる特徴を持つ流域が存在した。プロセスは必ずプロセス 1 から始まるわけではなく、順番通りにプロセスが進むわけでもないことがわかつたが、中部や四国のようにプロセスがほとんど 1 から順に埋まっている地域も存在していた。
- ② 成分分離した結果によると、降雨流出プロセス番号と時定数  $T_c$  の関係が一意に決まらないことがわかつた。そこで著者らは  $\log_5 T_c$  による時定数  $T_c$  の範囲を定めて、降雨流出プロセスを統一的に決定する手法を提案した。具体的には、 $\log_5 T_c$  の値の 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 を降雨流出プロセスの境界値と定め、その境界値の間が降雨流出プロセスの各プロセスであり、値が小さい方の範囲（流出が速いプロセス）から 1, 2, 3, 4, 5 と番号を付けて、この番号が降雨流出プロセス番号と対応するとした。この境界値に従って時定数  $T_c$  から降雨流出プロセスを明確に決定できるが、この手法についてはまだ検討が必要である。
- ③ 今後は標高・表層地質などの地質地形条件や、降雨量などの気候条件について降雨流出プロセス数との関係を整理する必要がある。

本研究では、降雨流出プロセス数の成因を見つけることはできなかつた。今後は、降雨流出プロセス数と気候・地質条件との関係を整理し、何が降雨流出プロセス数に影響しているかを調べていく必要がある。その上で、 $\log_5 T_c$  による時定数  $T_c$  の範囲を定めて、降雨流出プロセスを統一的に決定する手法について、さまざまな検証のもとにこの手法の適用可能性について検討していく必要がある。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金（若手研究 B, 24760388）、科学研究費補助金（基盤 B, 22360192）、環境省環境研究総合推進費 S-8-1(4) の成果の一部である。本研究の実施にあたり、国土交通省の水文水質データベース、数値地図情報を活用した。ここに謝意を記す。

## 参考文献

Barnes, B. S. (1939), The Structure of Discharge-Recession Curves, *Trans. American Geophysical*

*Union*, 20(4), pp.721-725.

Boussinesq, J. (1904), Recherches theoriques sur l'ecoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources, *J. Math. Pure Appl.*, 10, pp.5–78.

西山光・横尾善之 (2013), 降雨流出過程の地域性に関する研究, 東北地域災害科学的研究, 第49卷, pp.145-150.

日野幹雄・長谷部正彦 (1982), フィルタ一分離 AR 法による非線形流出系の同定と予測 (時間単位), 土木学会論文報告集, No.324/ II-8, pp.83-94.

日野幹雄・長谷部雅彦 (1985), FORTRAN と BASIC による 水文流出解析, 森北出版, 254pp.