

## 降雨流出過程の地域性に関する研究\*

福島大学共生システム理工学類 西山 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モデル構造やパラメータに不確実性がある。例えば菅原 (1972)は、日本の流域のタンクモデル構造は、洪水解析用が2または3段構造、日流量解析用が4段構造となる可能性を示しているが、それらの結果にも不確実性がないとは言いきれない。理想的には、タンクモデルの段数は流域内の代表的な降雨流出プロセス数に対応しているべきであるが、上記の不確実性が排除できない問題のため、実際に日本の流域のタンクモデル段数あるいは降雨流出プロセス数を網羅的な整理に成功した研究は存在しない。

一方、Barnes (1940)は流量の時系列データを対数プロットすると逓減部の勾配は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、勾配の急な直線から順に表面流、中間流、地下水流に対応すると提案している。この手法を吉川・砂田・フン (1979)は日本国内の神流川、梓川の2流域の洪水波に適用し、それを再現するタンクモデルの構造決定に成功している。また、日野・長谷部 (1982)は日本国内の神流川、梓川、相模川の3流域にBarnes (1940)の手法を数値フィルターのパラメータ決定に適用し、洪水波の成分分離に成功している。これらの先行研究を踏まえると、日本全国の流域の1年分の毎時の流量データを用いて河川流量の成分分離に必要な時定数の統一的な決定方法を提案できれば、日本全国の流域の降雨流出モデルの構造を流量データのみから統一的に決定できる可能性がある。

そこで本研究では日本の一級河川109流域と沖縄県の2流域を対象に、Barnes (1940)の手法と日野・長谷部 (1982)の手法を用いて1年分の毎時の河川流量の成分分離を行い、流量逓減部の時定数 $T_C$ の大きさから降雨流出プロセス数を統一的に決定する手法を提案するとともに、降雨流出プロセス数と流域面積の関係を考察する。

### 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。時間流量データは観測所の流域面積で除し、単位を $\text{mm/h}$ と変換して利用した。

#### 2.2 成分分離方法

本研究はBarnes (1940)の手法を用いて時間流量データの成分分離を行った。逓減時の観測流量 $Q$  ( $\text{mm/h}$ )は式(1)のように表現でき、 $Q_0$  ( $\text{mm/h}$ )は初期値流量であり、 $\alpha$  ( $\text{h}^{-1}$ )は逓減係数である。これを式(2)に変形し、取得した流量データの対数プロットグラフを作成し流量変動を明らかにして、図-1で囲った区間のように比較的長く継続している逓減部分を抽出した。

\*Investigating variability and regionality of Japanese rainfall-runoff processes by Hikaru Nishiyama and Yoshiyuki Yokoo

これは長く継続している通減区間ほどその流域の降雨流出プロセスを多く抽出できると考えたためであり、この条件に合う区間を流域ごとに1区間ずつ抽出した。次に、図-2のように抽出した通減区間の勾配変化について直線を引いた。直線を引く際には、流量の急激な増加区間は読み取らないように注意して、その区間以外の流量を平滑的に読み取った。以上のようにして引いた直線から、直線の傾き  $\alpha$  ( $\text{h}^{-1}$ ) の逆数である時定数  $T_c$  (h) と降雨流出プロセス数を表す直線の数を求めた。

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

$$\ln Q = -\alpha t + \ln Q_0 \quad (2)$$

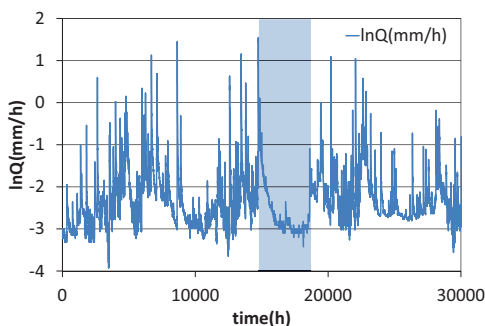


図-1 対数プロットグラフから通減区間を抽出

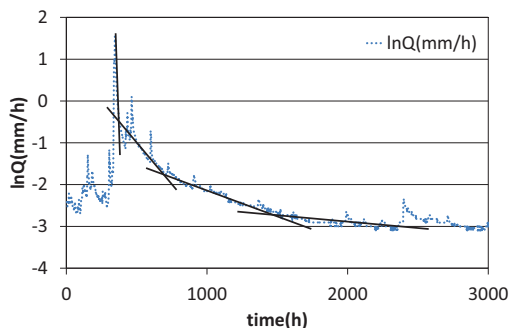


図-2 通減曲線と成分分離の関係

### 3. 結果

#### 3.1 降雨流出プロセス数と対象流域の関係

図-3 は流域ごとに直線の本数を求めた結果である。Barnes (1940)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。

69 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6割を占める。さらに降雨流出プロセス数は最小で3つ、最大で5つあることがわかった。

本研究では、時間流量データの対数プロットグラフから通減区間を流域ごとに1区間ずつ抽出したが、抽出数を増やして流域ごとに2区間や3区間抽出して成分分離を行えば、降雨流出プロセス数が変化する可能性がある。この場合の解決法としては、2つの条件[(1)対象流域の中で抽出した通減区間の長さが比較的長い、(2)対象流域の中で平滑的に通減している区間]を満たしていればその流域の中で1区間だけ成分分離をすれば良いと考えられるが、反対にこの2つの条件を満たしていない流域(抽出した通減区間の長さが短く、流量変動の激しい区間)であれば1区間だけでなく、2区間や3区間抽出して成分分離を行う必要があるだろう。

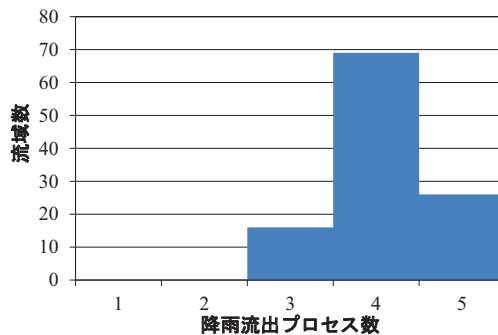


図-3 降雨流出プロセス数と対象流域数の関係

図-4 が地域別に降雨流出プロセス数の存在率を算出した結果である。

ほとんどの地域で存在率として高いのは降雨流出プロセス数が4つの場合である。さらに降雨流出プロセス数が北陸では3つ、九州・沖縄では5つの流域が多く、四国には5つの流域がないことがわかる。

### 3.2 時定数 $T_C$ と降雨流出プロセス番号の関係

図-5 が流域ごとに算出した時定数  $T_C$  の結果である。横軸の降雨流出の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2.5(h)、最大で12500(h)であった。さらに、縦軸を対数軸とすると時定数  $T_C$  がある程度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  $T_C$  であ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、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る。

そのため、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6とした対数値 ( $\log_6 T_C$ ) 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。この境界値に従って図-5 のデータをプロットし直したのが図-6 であり、これにより降雨流出プロセスを明確に時定数  $T_C$  から決定できるが、この結果の正確性についてはまだ検討が必要である。

図-7 はデータ区間を  $6^{0.5}$ ,  $6^{1.5}$ ,  $6^{2.5}$ ,  $6^{3.5}$ ,  $6^{4.5}$ ,  $6^{5.5}$  の5区間として時定数  $T_C$  についてヒストグラム解析をした結果である。図-3 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、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。この結果だけでは降雨流出プロセスに関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-6 を作

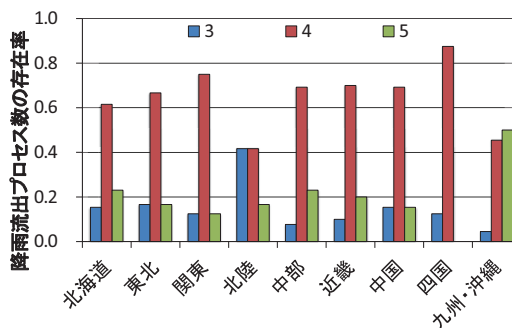


図-4 地域別の降雨流出プロセス数の存在率

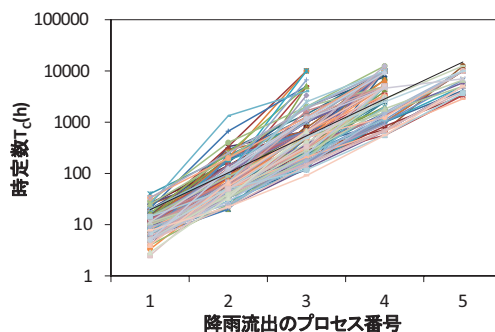


図-5 時定数  $T_C$  と降雨流出プロセス番号の関係

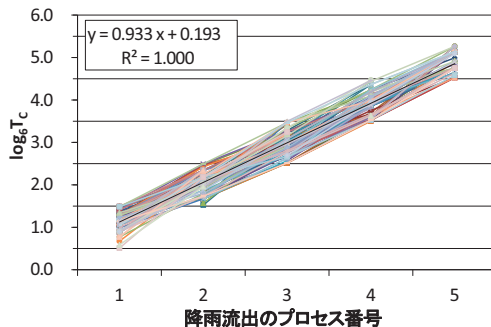


図-6  $\log_6 T_C$  と降雨流出プロセス番号の関係

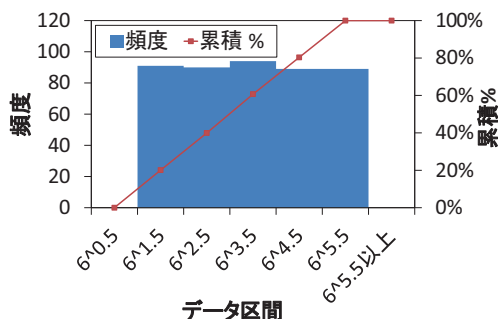


図-7 時定数  $T_C$  (h) のヒストグラム解析

成した。

### 3.3 流域面積と降雨流出プロセス数の関係

図-8 は対象としている観測所の流域面積( $\text{km}^2$ )と降雨流出プロセス数の関係を表している。降雨流出プロセス数は図-3 と同様に流域ごとに求めた直線の本数を表している。観測所の地形条件である流域面積( $\text{km}^2$ )が降雨流出プロセス数に影響していると考えたが、両者の関係に相関はみられなかった。

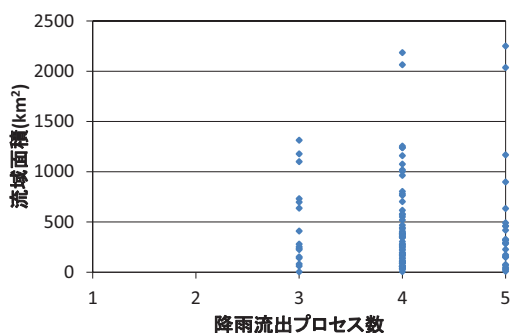


図-8 流域面積と降雨流出プロセス数の関係

## 4. 考察

### 4.1 降雨流出プロセス数と対象流域の関係

図-3 で分かった降雨流出プロセス数の最小が3つ

で、最大が5つであるという結果は、Barnes (1940)、日野・長谷部 (1982)の結果とは異なる。Barnes (1940)、日野・長谷部 (1982)は大きい流域では降雨流出プロセス数が3つになり、小さい流域では2つになることを示していた。タンクモデルの段数が降雨流出プロセスに対応していると考えると、菅原 (1972)が示したタンクモデルの段数のみに着目すれば、本研究の結果はタンクモデルの最大段数が一つ増えたことになる。さらに、図-8 に示すように流域面積の大きさと降雨流出プロセス数の関係に相関はみられなかった。これらの結果の差異は、時間流量データの対数プロットグラフから逡減区間を抽出する際に主観が入り込んでしまうこと、Barnes (1940)、日野・長谷部 (1940)よりも対象としている流域数が多くなっていること、流域スケールを考慮していないことが原因であると考えられる。

次に図-4 の結果から、ほとんどの地域で存在率として高いのは降雨流出プロセス数が4つの場合であることがわかる。これは菅原 (1972)の日流量解析用のタンクモデルが4段になっていたことと対応していると考えられるが、降雨流出プロセス数が3つの流域や5つの流域も存在しているため、地域ごとに降雨流出プロセス数を一意に定めることはできないと考えられる。日野・長谷部 (1982)はAutoregressive moving average(ARMA)モデルの適用で流域のモデルの相違には、流域面積の違い、流域を構成している地質地形構造の違いが影響している可能性を指摘している。図-3 の結果と合わせて今後は、対象流域の観測所の上流部や周辺がどのような地質地形構造の特徴を持つか、どのような気候条件が降雨流出プロセス数に影響しているかを調べる必要がある。

### 4.2 時定数 $T_c$ と降雨流出プロセス番号の関係

時定数  $T_c$  は最小で2.5h、最大で12500hであった。一方で日野・長谷部 (1982)が対象とした神流川、梓川、相模川では直線の勾配が急な順で、2番目もしくは3番目の直線の時定数は37~45hの範囲であった。これは本研究結果の降雨流出プロセス番号の1, 2番の時定数に対応していることから、成分分離結果としては十分な結果が得られたと考えられる。

しかし、図-5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-7の結果をもとに図-6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、次に日野・長谷部 (1982), 芳賀 (2011)などが行った数値フィルター解析や水質の時系列データを用いた降雨流出プロセスの分離による検証を行う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、Barnes (1940)の手法である片対数プロットの通減曲線による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 4 つの割合が高かったが、北陸では 3 つ、九州・沖縄では 5 つの割合が高いなど異なる特徴を持つ流域が存在した。
- 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った。そこで著者らは  $\log_6 T_c$  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、 $\log_6 T_c$  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 降雨流出プロセス数と観測所の流域面積との関係には相関はみられなかった。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。

今回の研究では、降雨流出プロセス数の成因を見つけることはできなかった。今後は、降雨流出プロセス数と気候・地理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、 $\log_6 T_c$  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。

## 6. 謝辞

本研究は、東京大学総括プロジェクト機構「水の知」（サントリー）総括寄付講座、科学研究費補助金（若手研究 B, 24760388）、環境省環境研究総合推進費 S-8-1(4)、JST/JICA-SATREPS 「気候変動に対する水分野の適応策立案・実施支援システムの構築(IMPAC-T)」、東北大学災害科学国際研究所「特定プロジェクト研究(B-18)」、科学研究費補助金（基盤 B, 22360192）の成果の一部である。また、本研究は国土交通省の水文水質データベース、数値地図情報、ダム諸量データベースを活用した。ここに謝意を記す。

## 参考文献

- Barnes, B.S. (1940), Discussion of analysis of runoff characteristics, *Trans. ASCE*, 105.
- 芳賀友洋 (2011), 数値フィルターと水質データを用いた阿武隈川の流量時系列データの成分分離に関する研究, 東北地域災害科学研究 47, 153-158.

- 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), 土木学会論文報告集, No.324/II-8, pp.83-94.
- 吉川秀夫・砂田憲吾・グエン・ソン・フン (1979), 洪水流量逓減部曲線の特性を考慮した流出モデルに関する研究, 土木学会論文報告集, No.283, 23-32.
- 菅原正巳 (1972), 流出解析法, 共立出版.