

河川流量の成分分離を利用した降雨流出モデルの構造 およびパラメータの推定*

福島大学共生システム理工学類 芳賀 健大朗

福島大学共生システム理工学研究科 小林 秀平

福島大学共生システム理工学類・福島大学環境放射能研究所 横尾 善之

1. はじめに

降雨流出モデルの一つであるタンクモデルは降雨に対する河川流出の応答を表現することを目的として菅原(1972)によって提案された。現在では気象庁が土砂災害予測に用いている土壤雨量指数にもタンクモデルが応用されている。

多くの場合、タンクモデルはタンクの段数や流出孔の個数といったモデルの構造およびタンクからの流出を制限するパラメータをモデルの計算値と実測値とを照らし合わせながら試行錯誤の末に決定する。タンクの段数が n の場合は、表面流出を一番上の第1タンクで表現し、その下層にいくつかのタンクを設置し、最下層の第 n タンクで基底流出を表現する。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た。また一般に決定すべきパラメータは、タンク側面にある流出孔からの流出量を制限する流出率、タンク底面から流出孔までの高さ、タンク底面にある浸透孔から下層のタンクへの浸透量を制限する浸透率、タンクモデル内の初期水位などがある。しかし、タンクモデルの構築ではモデルの構造およびタンクモデル全体で多くのパラメータを決定しなければならないので、モデル構造やパラメータに不確実性が生じる。このモデルの不確実性を減少できれば、より現実に近い流出過程を表現できると考えられる。

この問題に対し、吉川ら(1979)は流出の特性から流出モデルの構築を試み、洪水流量遅減曲線から得られる標準低減曲線を用いて独自のタンクモデルを構築した。これは流域特性を考慮に入れ、現実に即した流出モデルの構築を検討した研究である。この研究の考え方を踏襲し、本研究では、日野・長谷部(1985)の成分分離を利用し、不確実性が少ないモデルの構造およびパラメータの推定法の開発を試みる。

2. 方法

2.1. 対象流域および使用データ

本研究では、阿武隈川の阿久津観測所において観測された河川流量のデータを用いた。雨量および河川流量の毎時のデータは国土交通省の水文水質データベースから取得した。成分分離は欠損が無い2005年~2007年の3年間の河川流量のデータに対して行い、タンクモデルは2007年の成分分離した流量および雨量を使用して構築を行った。



図-1 阿久津観測所の位置

*Toward identification of structure and parameter of rainfall-runoff model by using hydrograph separation by Kentaro Haga, Syuhei Kobayashi and Yoshiyuki Yokoo

2.2. 観測流量の成分分離

流量の成分分離では、まず対数表示した流量の遞減部分をいくつかの直線で表現し、その直線の傾きの逆数を時定数 T_c として求める。この T_c から式(1)により求めた c_0 と c_1 を式(2)に代入して数値フィルター $\omega(\tau)$ を求める。そして $\omega(\tau)$ を式(3)に代入し流量の成分分離を行う。

$$c_0 = (2.1/T_c)^2, \quad c_1 = 2.1^2/T_c \quad \cdots(1)$$

$$\omega(\tau) = \begin{cases} c_0 \exp\left(-\frac{c_1\tau}{2}\right) \sinh \sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0} \tau / \sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0} & (\tau > 0) \\ 0 & (\tau \leq 0) \end{cases} \quad \cdots(2)$$

$$Q'(t) = \alpha \sum_{\tau=0}^{26279} \omega(\tau) Q(t-\tau) \quad \cdots(3)$$

式(3)における α は重み係数であり、成分分離前の流量から成分分離された流量を引いて求めた残流量が負の値とならないように設定する。

2.3. 成分分離された流量からのタンクモデル構築

タンクモデル構築には成分分離結果の分離された成分の数および 3 年間の分離結果のうち 2007 年の分離された流量を使用した。

分離された成分数をタンクモデルの段数とし、分離された各流量の表面流から基底流までを順番にタンクモデルの 1 段目から n 段目までの河川への流出量とした。なお各タンクの側面にある流出孔は 1 つとし、最下層の第 n タンクは浸透孔を設けずに流出孔からの出力のみとした。

タンクモデルの構築では、表面流の成分に分離された流量 Q_1 を 1 段目のタンクにおける河川への流出量 Q_{c1} とし、 Q_{c1} を Q_1 に沿わせるようにパラメータを決定する。このとき決定するパラメータは、流出孔からの流出量を制限する流出率 a_1 、タンク底面から流出孔までの高さ z_1 、浸透孔からの下層のタンクへの浸透量を制限する浸透率 b_1 、タンクモデル内の初期水位 $h_1(t=0)$ の 4 つである。以降は成分分離により得られた成分の個数だけ下層にタンクを設置し、第 1 タンクと同様に 1 つのタンクモデル内において成分分離された流量 Q_n と式(4)より求めた河川への流出量 Q_{cn} が沿うようにパラメータを最適化する。なお 1 段目のタンクの入力データは雨量 P_1 を用い、2 段目以降は式(5)より得られた上段のタンクからの浸透量 P_n を入力データとして使用した。また式(4)と式(5)における時間変動するタンク内の水位 h_n は式(6)で表した。

$$Q_{cn}(t) = a_n(h_n(t) - z_n) \quad \cdots(4)$$

$$h_n(t) = h_n(t-1) - Q_n(t-1) - P_{n+1}(t-1) + P_n(t) \quad \cdots(5)$$

$$P_n(t) = b_n h_n(t) \quad \cdots(6)$$

3. 結果

3.1. 流量の成分分離結果

観測流量を成分分離する際に使用した時定数を表-1 に示した。図-2 および図-3 は 2007 年における成分分離後の各成分の流量である。図-3 は基底流などの流出が遅い成分を見やすくするために流量の自然対数をとって示した。成分分離の結果、阿久津観測所における観測流量は 4 成分に分けられた。この 4 成分 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 は流出の速さという観点からそれぞれ表面流、

速い中間流，遅い中間流，基底流の成分と見なした。なお成分分離の際に成分分離前の流量から成分分離された流量を引いて求めた残流量が負の値とならないように行うが，分離された流量が分離前の流量を越えてしまうことが少なからずある。そのため成分分離された流量の合計と観測流量の合計は必ずしも一致しない。表-2に成分分離された流量と観測流量のそれぞれの合計を示した。成分分離された流量の合計を観測流量の合計で割った商が 1.03 となり誤差は 3%におさまったのでタンクモデル構築にあたっての支障は少ないと考えられる。

表-1 成分分離の際の時定数 T_c

	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1
時定数 T_c (/hour)	1393.0	283.5	13.71	—

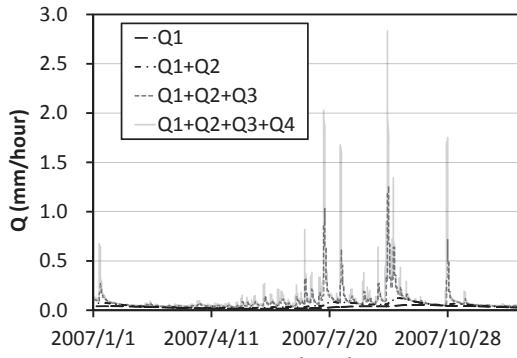


図-2 流量の成分分離結果

表-2 分離された流量の合計と観測流量の合計

分離された流量の合計 (mm/hour)	3173.0
観測流量の合計 (mm/hour)	3083.0

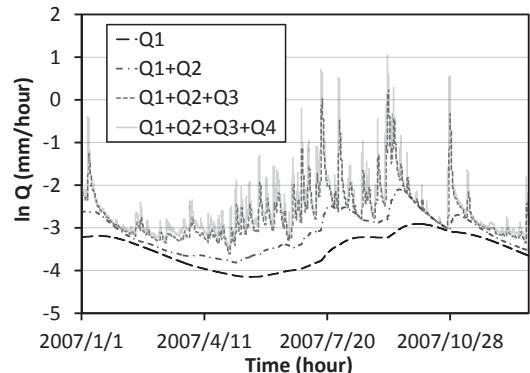


図-3 流量の成分分離結果(対数)

3.2. 成分分離された流量からのタンクモデル構築

成分分離の結果から観測流量が 4 成分に分かれたのでタンクモデルを 4 段とし，成分分離された流量 Q_n とタンクモデルで計算された流出量 Q_{cn} の差が最小となるようにパラメータを決定した。表-3 にタンクモデルの各段において決定したパラメータを示した。また流量 Q_n と流出量 Q_{cn} および観測流量の 2007 年におけるそれぞれの流量の合計を表 4 に示した。図-4 から図-7 には順番に 1 段目のタンクから 4 段目のタンクまでの成分分離された流量 Q_n とタンクの流出量 Q_{cn} の時間変化を示した。図-8 には分離された各成分の流量の合計とタンクモデルにより計算された各タンクの流出量の合計を示した。

表-3 タンクモデルの各段において決定したパラメータ

	1 段目 (n=1)	2 段目 (n=2)	3 段目 (n=3)	4 段目 (n=4)
a_n	2.92E-02 1/h	1.17E-02 1/h	9.86E-04 1/h	7.35E-04 1/h
b_n	8.97E-02 1/h	1.05E-02 1/h	1.24E-03 1/h	—
z_n	0.00 mm	0.00 mm	3.71 mm	51.6 mm
$h_n(t=0)$	1.49 mm	8.64 mm	61.1 mm	100 mm

表-4 分離された流量とタンクの流出量および観測流量の 2007 年における合計

	分離された流量 Q_n	タンクの流出量 Q_{cn}	観測流量
流(出)量の合計 (mm/hour)	1013.0	943.3	980.5

表-3においてパラメータの流出率 a_n および浸透率 b_n は下層のタンクになるほど値が小さくなつた。なお最下層の4段目のタンクでは浸透孔を考えなかつたので b_4 の決定は省いた。この流出孔と浸透孔のパラメータの値は、菅原(1972)の提示した日流量解析に対する出発モデル

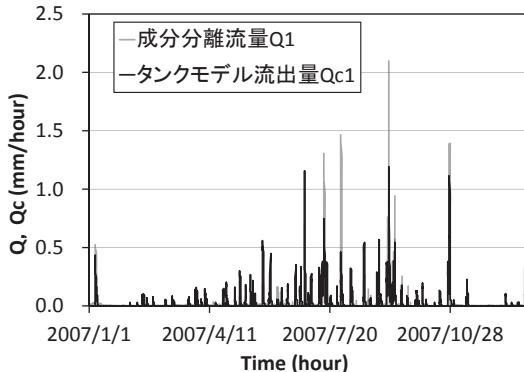


図-4 第1タンクにおける成分分離された流量
とタンクモデルでの計算結果の流出量

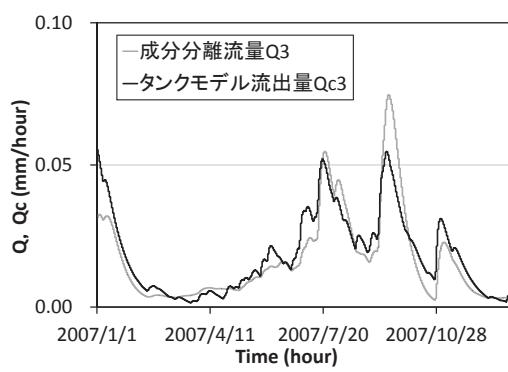


図-6 第3タンクにおける成分分離された流量
とタンクモデルでの計算結果の流出量

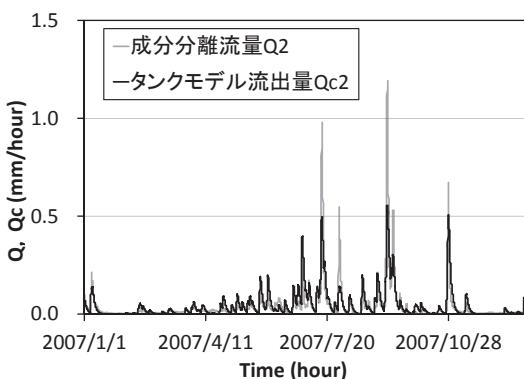


図-5 第2タンクにおける成分分離された流量
とタンクモデルでの計算結果の流出量

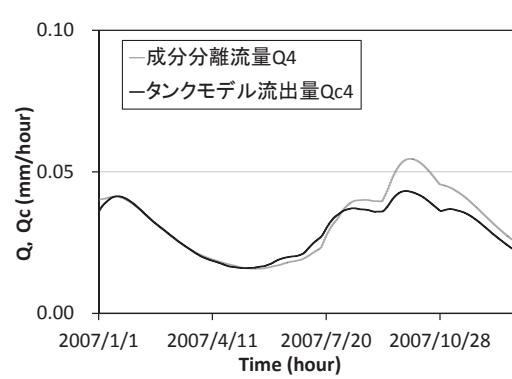


図-7 第4タンクにおける成分分離された流量
とタンクモデルでの計算結果の流出量

のパラメータの値よりも 10^{-1} ほど小さい値となつた。菅原(1972)は日流量解析であり、本研究が単位時間(1h)流量の解析であるという差違から生じたとも考えられるが、パラメータの決定において更なる改善が必要であるという結果とも捉えられる。また、タンクの底面から流出孔までの高さ z_n は1段目および2段目のタンクにおいて 0.0 mm となつた。これは1段目および2段目のタンクにおいて降雨や上段からの浸透といった入力があった場合、流出孔からの河川への流出と浸透孔からの下層のタンクへの浸透という2つの出力が常になされることを表す。一方、3段目および4段目においてはタンクの底面から流出孔までの高さ z_n が存在するのでタンク内の水位 h_n が z_n を越えない限り流出孔からの河川への流出は起こらず、タンク内に雨量を貯留しやすい構造となつた。

表-4より、タンクモデルで計算された流出量の合計を成分分離された流量の合計および観測

流量の合計でそれぞれ割ると商が 0.93 および 0.96 となった。つまりタンクモデルの計算結果は成分分離された流量および観測流量に対してそれぞれ 7%と 4%の誤差となった。

図-4 から図-7においてタンクモデルの流出量 Q_{cn} は成分分離された流量 Q_n の時間変動に対応したグラフ形状をとった。しかしながら第 1 タンクと第 2 タンクにおいては、タンクモデルの計算結果 Q_{cn} が成分分離された流量 Q_n のピーク時に対して応答はしたが、その時の値に達しない場合があった。第 1 タンクでは 9 月 7 日において最大で 1.22 mm/hour の差違が分離された流量とタンクモデルの計算値で生じた。その差は第 2 タンクでも同様に存在しているので Q_n と Q_{cn} のそれぞれの合計を示した図-8においてさらに大きくなっている。このことはモデルの構造やパラメータの決定方法の改善の余地を示している一方で、使用データの見直しの必要を示唆しているとも考えられる。本研究での使用データは阿久津観測所において観測された河川流量のデータおよび同観測所やその付近で観測された雨量のデータをそのまま用いている。タンクモデルに使用する雨量データとして蒸発散量等を差し引いた河川に直接影響を与える有効降雨を用いるべきであったと考えられる。

4. 考察

本研究は不確実性を少なくすることで、より現実に近い降雨流出モデルを構築できるという考えにもとづき、観測された河川の毎時の流量データを用いてタンクモデルの構築に至った。これは一般のタンクモデルの構築のようにあらかじめ全体のタンクモデルの構造等を決定した上で試行錯誤の末にパラメータを最適化するタンクモデル構築の方法と本質的には異なり、吉川ら (1979) のように流域の特性からモデルを構築していく方法である。ただし、吉川らの研究においては従来のタンクモデルの形状とは異なり、独自のタンクモデルの構築に至っている。本研究では対象河川において日野・長谷部 (1985) の成分分離を利用し、流出の特性から一般的なタンクモデルの構築に至った。この方法は比較的に簡易でありながらも流出特性を考慮していて、また流量を各流出過程の成分に分離することで各流出過程に相当するタンクの個数を設定でき、さらに各流出過程に分離された流量を基に各タンク内でパラメータを決定できるので、タンクモデル全体で一斉にパラメータを決定する方法よりも不確実性の減少が期待できる。

今回のタンクモデルの計算結果の流出量と成分分離された流量の結果である図 4 から図 7 をより、成分分離された流量の時間変動にタンクモデルの計算結果が対応したことが分かる。このことから流量の成分分離を用いたタンクモデル構築は可能であることが分かる。しかしながら、流量のピーク時の値にタンクモデルの計算結果が達しない場合があり、まだ完全なモデルとは言い難いが、吉川ら (1979) では流量の通減部から求める分離した成分の数が増えるほど、タンクの精度が向上しているので、本研究においても成分分離の数を増やすことで流量のピー

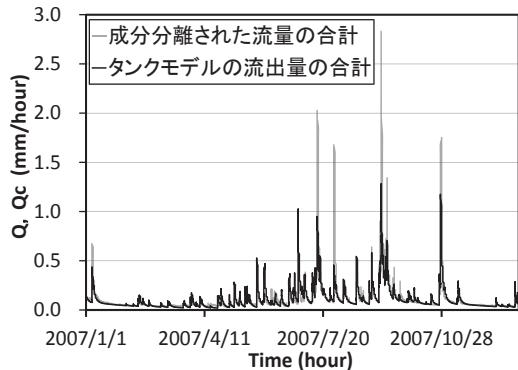


図-8 成分分離された流量の合計とタンクモデルでの計算結果の流出量

ク時に対応できると考えられる。またタンクモデルの精度を向上させる点では、タンクモデル構築の際に用いる降雨あるいは流出量の計算に用いる誤差の評価関数の見直し等が挙げられる。

本研究が今後、タンクモデルの精度を以上のこと等により向上させた場合、流量の成分分離からタンクモデルを構築する方法はより現実に近い流出過程を表現することができると思われる、構築したタンク内の水位の時間変動から地中の貯留量を求められた場合、土砂災害や渇水問題に適用できると考えられる。

5. 結論

本研究は不確実性の少ない降雨流出モデルの開発を目的として、タンクモデルの構造およびパラメータの推定の正確性を向上させるために河川流量の成分分離を利用する方法を検討し、以下の結果を得た。

- ① 成分分離結果を用いてタンクの構造やパラメータを推定することは可能であると考えられ、適用できればパラメータを決定することにあまり試行錯誤を要さずタンクモデルを構築できる。ただしタンクモデルへの分離結果の適用方法についてはまだ考慮が必要である。
- ② 流量と雨量のみを用いたモデル構築法であり、土地利用や土地被覆等のデータを利用しない点でモデルの構築が簡易的である。
- ③ 現実の流出過程を顕著に表現したタンクモデルの構築は、貯留量を導く手段となる可能性がある。これからはタンクモデル内の水位 h と流域スケールの雨水貯留量との関係を調べ、土砂災害への応用および渇水への対策の可能性を検討する。

今後は今回の結果より得られた課題について検討するとともに、対象流域を増やして他の河川においても成分分離を用いたタンクモデル構築法の適用性を検討する。また過去に起きた洪水や渇水とその時の貯留量の状況をモデルから検討することも考えている。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（若手研究 B, 24760388）、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）」、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）」、科学研究費補助金（基盤研究 B, 22360192）、JST/CREST「安全で持続可能な水利用のための放射性物質移流拡散シミュレータの開発」の成果の一部である。また国土交通省の水文水質データベースを活用した。ここに謝意を記す。

参考文献

- 吉川秀夫・砂田憲吾・グエン・ソン・フン (1979), 洪水流量遞減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), 水文学講座　流出解析法, 共立出版.
- 日野幹雄, 長谷部雅彦 (1985), 水文流出解析法, 森北出版.