

## 流域スケールの雨水貯留量の推定法に関する研究\*

福島大学共生システム理工学類 岡崎 聡史

福島大学大学院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 横尾 善之

### 1. はじめに

水収支式の変数である貯留量変化  $dS/dt$  と蒸発散量  $ET$  は流域スケールにおいて直接計測できないという問題点がある。このため、流域スケールの水収支式には2つの未知数があるために水収支式からの推定にも限界がある。この問題に対して Kirchner (2009)は、流域の流出過程が単一の式で表せるような流域において降水量  $P$  と蒸発散量  $ET$  が流量  $Q$  に対して十分小さいという条件のもと、毎時の流量データのみから貯留量の時間変化が算出できることを示した。しかし、横尾・小林・川崎 (2012)は Kirchner (2009)の手法を日本に適用し、流域の流出過程に複数の式が必要な場合には Kirchner (2009)の手法が適用しにくいことを示している。そこで本研究は日野 (1985)が提案した成分分離手法を用いて流量データを成分分離し、Kirchner (2009)の手法を用いて各成分に対応する貯留量を個別に算出して合計することで流域スケールの貯留量推定法の可能性を検討した。

### 2. 方法

#### 2.1 対象流域

本研究では、馬淵川石切所観測所、北上川田瀬ダム、鳴瀬川高田橋観測所、名取川湯本観測所、阿武隈川白河観測所の5つの流域を対象とした。(図-1)

この流域は東北地方の一級河川の中で人間活動の影響が少ないと思われる上流部であることとデータの欠損が少ないことを考慮して決定した。

#### 2.2 成分分離

本研究では成分分離に日野 (1982)のフィルター分離法を利用した。この手法では流量の減少区間をいくつかの直線で分け、それぞれの傾き  $a$  とその逆数である  $T_c$  を求める。この  $T_c$  から  $c_0 = (\delta/T_c)^2$ 、 $c_1 = (\delta^2/T_c)$  として式(1)より数値フィルター  $\omega(\tau)$  を求める。



図-1 対象流域の位置

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

\*Estimating watershed-scale storage by hydrograph separation and storage-runoff relationship, by Satoshi Okazaki, Syuhei Kobayashi and Yoshiyuki Yokoo

数値フィルターによって分離される各流量成分は式(2)によって求まる。

$$Q'(t) = \alpha \sum_{\tau=0}^{17520} \omega(\tau) Q(t-\tau) \quad \dots(2)$$

ここでの  $\alpha$  は重み係数であり、分離前のデータから分離後のデータを引いた残差が負の値をとらないように設定する。また、本研究では成分の数を4つに固定して成分分離を行った。

### 2.3 貯留量の算出

本研究では Kirchner (2009) の手法を利用した。Kirchner (2009) の手法ではまず、流量  $Q$  が貯留  $S$  の関数とする。

$$Q = f(S) \quad \dots(3)$$

式(3)の両辺を微分し、それを  $g(Q)$  とする。

$$\frac{dQ}{dS} = f'(S) = g(Q) \quad \dots(4)$$

式(4)に水収支式(5)を代入することで式(6)のようになる。

$$\frac{dS}{dt} = P - Q - ET \quad \dots(5)$$

$$g(Q) = \frac{dQ}{dS} = \frac{dQ/dt}{dS/dt} = \frac{dQ/dt}{P - Q - ET} \quad \dots(6)$$

夜間に蒸発散量  $ET$  が流量  $Q$  に対して十分小さいと仮定すると、夜間・無降雨期間において式(6)は式(7)のように近似できる。

$$g(Q) = \frac{dQ}{dS} \approx \frac{dQ/dt}{-Q} \quad (Q \gg P), (Q \gg ET) \quad \dots(7)$$

本研究では夜間を19時～6時、無降雨を6時間前まで雨が降っていないこととした。

ここで、もし流域の流出過程が式(8)のような単純な関係式で表せるとすると式(7)は式(9)のように変形できる。

$$-\frac{dQ}{dt} = aQ^b \quad \dots(8)$$

$$g(Q) = \frac{-aQ^b}{-Q} = aQ^{b-1} \quad \dots(9)$$

式(8)から図-2のように縦軸を  $-dQ/dt$ 、横軸を  $Q$  として近似式より流出パラメータ  $a$ 、 $b$  を求める。

式(4)の両辺を積分し、図-2のようなグラフから求めた流出パラメータを代入して積分定数  $S_0$  を含む  $S-S_0$  の形で式(11)から貯留量を算出する。

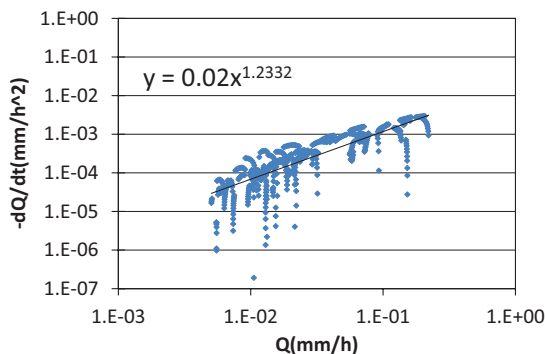


図-2 流量と流量変動の関係

$$\int dS = \int \frac{dQ}{g(Q)} = \int \frac{1}{a} Q^{1-b} dQ \quad \dots(10)$$

$$S - S_0 = \frac{1}{a} \frac{1}{2-b} Q^{2-b} \quad S_0 : \text{積分定数} \quad \dots(11)$$

また最終的な  $S-S_0$  の値は式(12)のように各成分の値を合計して算出する。

$$S - S_0|_{total} = S - S_0|_{Q1} + S - S_0|_{Q2} + S - S_0|_{Q3} + S - S_0|_{Q4} \quad \cdots(12)$$

### 3. 結果

#### 3.1 流量の成分分離

表-1 に分離の際の各成分の時定数  $T_c$  の値、図2~11 に各流域の成分分離の結果を示した (例：阿武隈川白河観測所)。ここで  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$ ,  $Q4$  はそれぞれ基底流、遅い中間流、速い中間流、表面流である。流出の遅い成分である  $Q1$  から順に流量変動が激しくなっているのがわかる。このことから、雨量の影響を受けやすい表面流や安定して長期変動をしている基底流のような各成分の特徴が表せているといえる。しかし  $Q3$  や  $Q4$  の一部に負の値が出てしまったので、成分分離の方法の改善が必要になる。フィルター分離法では数値フィルターの元となる時定数  $T_c$  の値の算出が重要であり、分離結果の不具合もこの時定数が原因となっている場合が多いため、時定数  $T_c$  の算出方法を見直すことを考えている。

表-1 各成分の時定数

	成分 $Q1$	成分 $Q2$	成分 $Q3$	成分 $Q4$
時定数 $T_c$	1000	166.6	23.8	

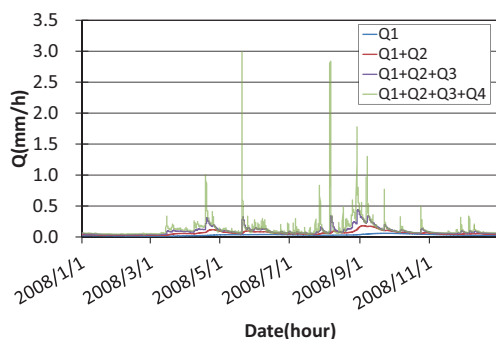


図-3 成分分離の結果

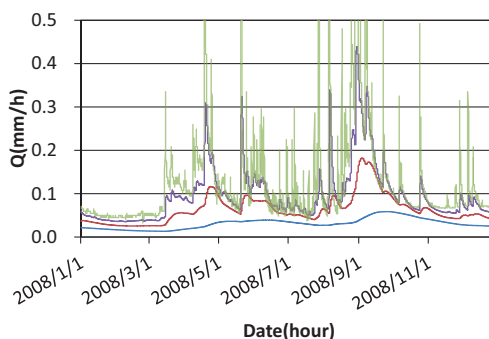


図-4 成分分離の結果 (拡大図)

#### 3.2 各成分の貯留量算出

表-2 に式(8)から求めた成分ごとの流出パラメータ  $a$ ,  $b$  を示した。この結果は図-5~8 の縦軸  $-dQ/dt$ , 横軸  $Q$  のグラフの近似式より算出した。この結果をみると成分ごとのパラメータの数値に違いがみられるため、流出の様子が異なるそれぞれの成分の特徴が示されているといえる。しかし、図-8 の表面流のグラフでは、まだ成分分離が十分ではなく、 $-dQ/dt > 0.001$  の部分に他の成分の影響が残ってしまっている。次に、図-9 の貯留量と流量の関係ではそれぞれの成分の流出パラメータを反映した特徴が示されている。このグラフをみると流出の遅い成分ほど流量の変動に対して貯留量の値が敏感に反応していることがわかる。このことから流出の遅い成分ほどその成分の流量と貯留量の関係性が強く、流出の速い成分ほど関係性が弱いということがいえる。また図-10 のグラフからも貯留量に基底流の成分の割合が高く、流出の遅い基底流が貯留量と最も関係が強いことがわかる。

表-2 各成分の流出パラメータ

	成分 Q1	成分 Q2	成分 Q3	成分 Q4
パラメータ a	0.0013	0.0011	0.0200	0.0157
パラメータ b	1.4075	0.7807	1.2332	0.5059

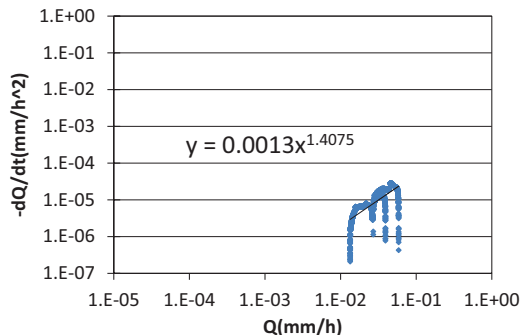


図-5 流出パラメータの算出: Q1

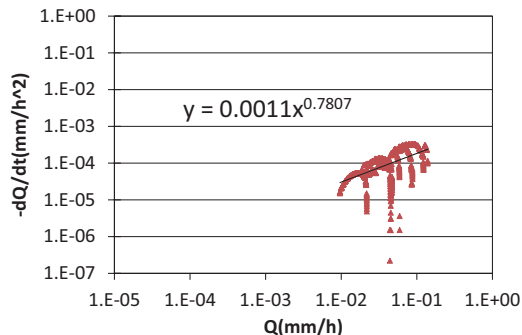


図-6 流出パラメータの算出: Q2

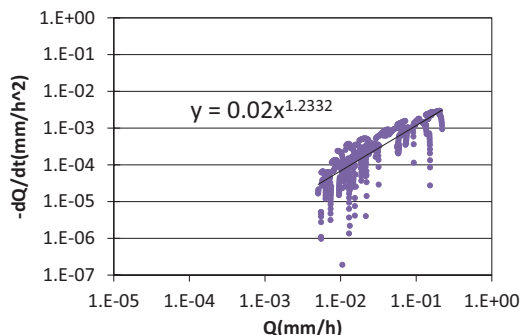


図-7 流出パラメータの算出: Q3

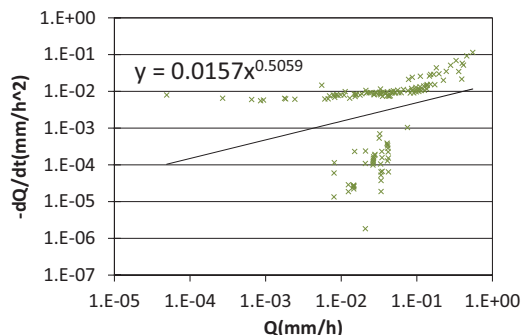


図-8 流出パラメータの算出: Q4

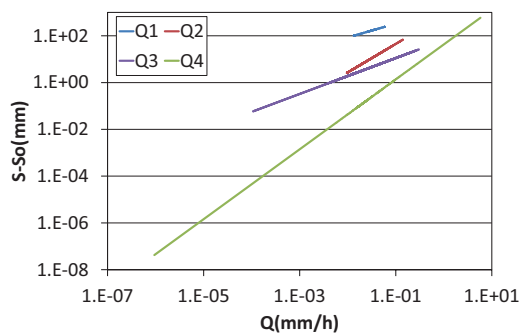


図-9 流量と貯留量の関係

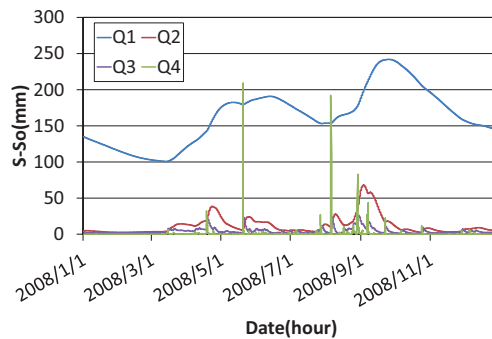


図-10 各成分の貯留量の算出結果

### 3.3 推定貯留量の年変化

図-11 に成分ごとに算出した貯留量の合計と Kirchner (2009)のオリジナルの手法によって算出した貯留量の値の年変化を示した。本研究の手法で計算した貯留量は常に 100 mm 以上の値を保っており、流域に常に安定的に存在している貯留量をより再現できており、ゼロに近い値が多いオリジナルの手法よりも現実的な結果と

なっている。また、雨量に左右されない安定した変動を示しているので貯留量の季節変化をみることができる。しかし、図-12 で対象とした5つの流域での算出結果を比較すると本研究で算出した貯留量の絶対量も貯留量に対する変動幅にも大きなばらつきがみられる。特に馬淵川と鳴瀬川の結果では著しく小さい値が算出された。また、阿武隈川の結果では他の流域に比べて貯留量の絶対値に対する変動幅が大きいことがわかる。そのため、今後は、ばらつきが出た原因を解明し、より正確な貯留量変動を算出できるように算出方法の改善をしたいと考えている。

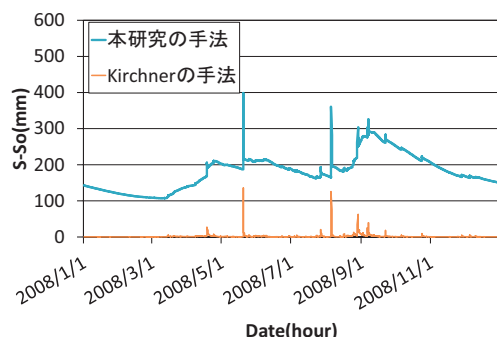


図-11 貯留量の算出結果

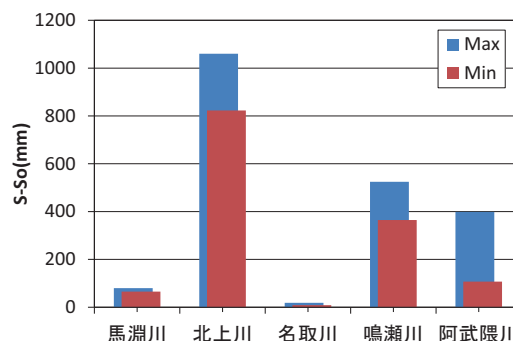


図-12 各流域の本研究での算出結果

#### 4. 考察

本研究では Kirchner (2009) の手法を日本の流域に適用して貯留量を算出した。また、既往研究により問題として挙げられた流域の流出過程が単一の式で表せない場合の解決策として成分分離を行った。成分分離によって成分ごとに貯留量を算出することで成分ごとに様子の違う流出過程を分けて考えることができるため、流出過程を表すのに複数の式が必要とされた流域についても Kirchner (2009) の手法が適用できると考えている。また、結果に負の値が出てしまった成分分離も、時定数  $T_e$  をより正確に算出することによって改善されると考えている。成分分離の精度を高めていくことで同時に貯留量の算出もより精度の高いものになることが期待される。

貯留量の算出結果としては基底流の割合が高いことから雨量による影響が少なく、安定した貯留量の変動を表すことができているといえる。季節変化についても梅雨の時期に最も貯留量の値が大きくなり、春の雪解け前が最も小さくなっていることからこの貯留量の変動がある程度は妥当であると考えている。しかし、流域ごとの結果にばらつきが生じたことについては今後の課題として検討していく必要がある。

また、Kirchner (2009) のオリジナルの手法と同様に結果に積分定数  $S_0$  を含んでいるため正確な貯留量の絶対値を算出することは出来なかったが、Kirchner (2009) の手法による結果よりも貯留量が安定していて貯留量の季節変化も読み取れることから、その流域での洪水や渇水の起こりやすい時期が特定できると考えている。

貯留関数法の欠点であるピークが複数ある洪水の予測に利用できる可能性がある。貯留関数法による流出予測では、複数のピークがある場合に最初のピークで貯留が飽和し、2つ目以降のピークにおいては土中に全く浸透しないものとして計算されている。しかし、最初のピークから次のピークになるまでの時間に土中に浸透した水の飽和状態が継続しているということはあるべきではない。この計算上の問題点を解決するために本研究の結果が利用できるのではないかと考えている。もし、ピークから次のピークまでの貯留量の変動が本研究の結果によって表せるのであれば、貯留関数法をより精度の高いものにできるだろうと考えられる。

## 5. 結論

本研究は、日本の洪水や渇水時の貯留量の状況を把握することを目的として、流域の流出過程に複数の式が必要な場合について、流出過程を単一の式と仮定した Kirchner (2009) の手法を有効にする手段として成分分離を行う方法の可能性を検討し、以下の結果を得た。

- ① 本研究で算出された貯留量は年間を通してゼロ近くまで下がることがなく、ある程度の値を保っていることや雨量の短期的な影響が少ないこと、長期的な変動による季節変化をみることができることなどの理由から、Kirchner (2009) の手法と比べて流域に安定して存在している貯留量の特徴をよく表している。そのため、洪水や渇水の起こりやすい時期がある程度は把握できる可能性が高いといえる。
- ② 成分分離では流出の遅い成分から速い成分になるほど流量の変動が激しくなり、それぞれの成分の特徴を反映した結果が得られた。しかし、表面流の結果の一部に負の値が出たことについては時定数  $T_c$  の値の改善が必要である。
- ③ 本研究で対象とした5つの流域での結果で  $S-S_0$  の値と変動幅のばらつきが大きく、流域ごとの結果に違いが生じてしまった原因を検討する必要がある。

今後は、今回の5流域の推定によって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、それぞれを比較することで流域ごとのばらつきの原因を解明すること、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合わせて検討することを考えている。

## 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

- 日野幹雄, 長谷部正彦 (1985), FORTRAN と BASIC による水文流出解析, 森北出版株式会社
- Kirchner, J. W. (2009), Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward, *Water Resour. Res.*, 45, W02429, doi:10.1029/2008WR006912.
- 高橋裕 (1990), 河川工学, 東京大学出版。
- 横尾善之, 小林秀平, 川崎雅俊 (2012), 日本の山地流域における貯留量変化および貯留能の推定に向けた基礎的検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), 第 68 巻, pp.I\_475-I\_480.