

## 東北地方の山地流域における雨水貯留量変動の推定に関する基礎的検討\*

福島大学共生システム理工学類 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

貯留量や地下水涵養量はこれまで降雨流出モデルや水収支モデルの状態変数として推定されてきたが、モデルの構造やパラメータの値に不確実性が含まれてしまい、採用したモデル固有の値として評価されてしまう欠点がある。一方、水収支式から流域の貯留量や地下水涵養量を推定することは理論的には可能であるが流域スケールの貯留量  $S$  と蒸発散量  $ET$  が直接測定できないため、貯留量  $S$  や貯留量変化  $dS/dt$  の推定値には不確実性がある。

これに対して Kirchner (2009)は、降雨流出過程が単一の貯留モデルで再現できるような流域であれば、降雨量  $P$  と蒸発散量  $ET$  が流量  $Q$  よりも十分小さいという条件下での時間流量の時系列データを解析することで、時間流量データのみから貯留量や貯留量変化の算出ができることをイギリスの流域の観測データを利用して示している。この方法の特徴は、夜間・無降雨期間の流量逓減時の流量変化から貯留量の変動を推定する点にある。この方法を用いると、流量変動のみから貯留量や貯留量変化の算出ができるため、解析条件によっては貯留量や貯留量変化の推定における不確実性を減らすことができると著者らは考えている。Teuling *et al.* (2010)は、降雨流出過程を3つの貯留モデルで構成する必要がある流域に Kirchner (2009)の手法を適用する方法を提案している。しかし、東北地方の流域における適用性については報告されていない。

そこで本研究は、Kirchner (2009)の方法の日本における適用性や利用方法を検討することを目的として、東北地方の山地ダム流域を対象に貯留量変化の算出を試みた。

## 2 方法

## (1) 対象流域および使用データ

本研究は東北地方の6か所のダム流域を対象とした。データの欠測が少ないことと、最上流のダム流域であることを条件とした。対象流域の毎時の雨量および流入量を国土交通省の水文水質データベース

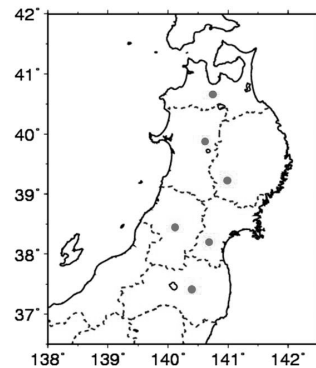
(<http://www1.river.go.jp/>) から取得した。雨量データの記録がない場合は、より上流の地点にある観測所のものを利用した。

## (2) 貯留量変化の推定方法

本研究が検討を行う Kirchner (2009)の手法の概要を紹介する。まず式(1)のように流量  $Q$  は貯留量  $S$  の関数であるとする。

$$Q = f(S) \quad (1)$$

次に、式(1)の両辺を  $S$  で微分した式(2)を得る。



\* Estimating storage changes of mountainous watersheds in the Tohoku region by Syuhei Kobayashi and Yoshiyuki Yokoo

$$\frac{dQ}{dS} = f'(S) \quad (2)$$

式(2)に水収支式(3)を代入することで式(4)を得る.

$$dS/dt = P - ET - Q \quad (3)$$

$$g(Q) = \frac{dQ}{dS} = \frac{dQ/dt}{dS/dt} = \frac{dQ/dt}{P - ET - Q} \quad (4)$$

式(4)は、降水量  $P$  と蒸発散量  $ET$  が流量  $Q$  に比べて十分に小さい場合、式(5)のように近似できる.

$$g(Q) = \frac{dQ}{dS} \approx \frac{dQ/dt}{Q} \quad (5)$$

$P \ll Q, ET \ll Q$

降水量  $P$  と蒸発散量  $ET$  が流量  $Q$  に比べて十分に小さいという条件を満たす場合、たとえば強雨後の出水時における流量遞減過程が蒸発散量の比較的小さい夜間に発生した場合、その間の流量データを用いることで、流域の貯留量と流量の関係が決まることになる. この点が Kirchner (2009)の手法の特徴の一つである. 本研究では対象流域の2006年~2008年の3年間で、夜間は19時から6時までとした. 仮に、流域の降雨流出過程が非常にシンプルな関係式(6)で表現できる場合には、式(5)は式(7)のように変形できる.

$$-dQ/dt = aQ^b \quad (6)$$

$$\int dS = \int \frac{dQ}{g(Q)} = \int \frac{1}{a} Q^{1-b} dQ \quad (7)$$

この式(7)を積分することにより、流域の貯留量  $S$  と流量  $Q$  の関係式が式(8)のように求まる.

$$S - S_0 = \frac{1}{a} \frac{1}{2-b} Q^{2-b} \quad (8)$$

したがってこの場合、毎時の観測流量  $Q$  の変動特性を調べることでパラメータ  $a$  および  $b$  を決定することができれば、流量データのみから流域スケールの貯留量  $S-S_0$  が計算できることになる. なお、式(8)における  $S_0$  は積分定数であり、簡単に決定できる値ではない. このため、流域の貯留量は積分定数を含めた  $S-S_0$  としてのみ計算でき、 $S$  自体は算出できていない.

### (3) 流域の評価方法

流量と貯留量の縦横比を式(9)で計算し、これを貯留量・流量指標  $I_{SQ}$  と定義して流域分類の指標に利用する.

$$I_{SQ} = \frac{Q_{\max} \cdot \Delta t}{S_{\max}} \quad (9)$$

ここで、 $Q_{\max}$  および  $S_{\max}$  は最大流量 (mm/h)、最大貯留量 (mm)であり、 $\Delta t$  は流域の流量観測の時間間隔 (h) である. 本研究では  $\Delta t$  が1時間なので1をかけるだけである. 貯留量・流量指標  $I_{SQ}$  の値はその算出に利用するデータに依存してしまうものの、流域の貯留・流出に関する大まかな特性を示す有効な指標になり得ることを示している.

## 3 結果

### (1) 対象流域ごとの流量と流量変動の関係性

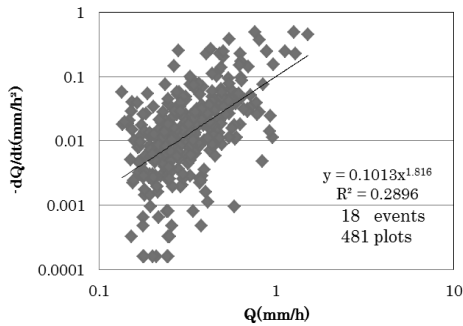


図-2 流量と流量変化の関係（浅瀬石川ダム）

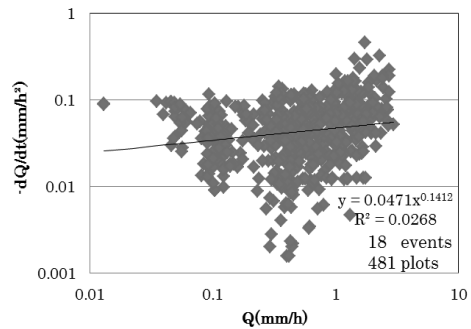


図-3 流量と流量変化の関係（寒河江ダム）

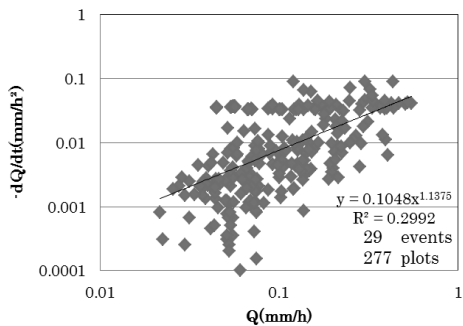


図-4 流量と流量変化の関係（釜房ダム）

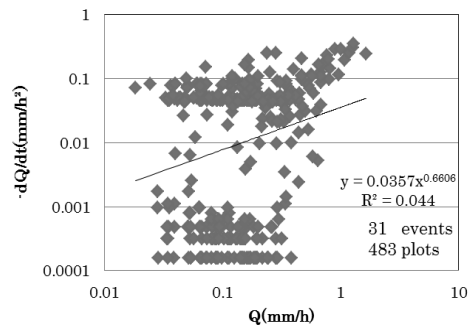


図-5 流量と流量変化の関係（三春ダム）

Kirchner (2009)の方法に従って無降雨期間の流量通減部における対象流域ごとの流量  $Q$  と流量変動  $-dQ/dt$  の関係性について図-2～4 で示した。グラフには何個の減少カーブからデータを取っているかをイベント数、何個のデータをプロットしているかを示すプロット数を載せた。流域より傾向の度合の大小はあるが Kirchner (2009)と同様に流量の小さいときは、流量変動の値の幅が小さく、流量が大きくなるにつれて式(6)の曲線に収束する傾向が見て取れる。釜房ダムはその傾向が強く出ているが、浅瀬石川ダム・寒河江ダムはその傾向は弱く見える。石淵ダム・三春ダムは似たような分布を示し、流量の値に関係なく流量変動が 0.01 より小さいときに一定の値をとっているように見える。パラメータ  $b$  の値は降雨流出過程における流域の感度を表すものといえる。浅瀬石川ダム・寒河江ダム・釜石ダムでは 1.5 前後の値になった。玉川ダムでは  $-0.084$  になった。そのため今回は玉川ダムに  $b$  が正値となることを前提としている Kirchner (2009)の手法を適用することはできない。石淵ダム・三春ダムは 1.14 と 0.66 という値をとり、データの分布は似ていたがパラメータの値には差が出た。石淵ダム・三春ダムの散布データは大きく見ても  $0.001 \sim 0.01$  ( $\text{mm/h}^2$ )の部分に二つのブロックに分かれている。このような場合複数の式が必要なのかという点については、今後の課題として研究を進める必要がある。

## (2) 対象流域ごとの $S$ - $So$ の年間変化

式(6)のパラメータによって流域の流出特性をおおまかに表現できるとして、観測流量とパラメータを式(8)に代入することで貯留量  $S$ - $So$  を算出した結果を図-6～9 に示す。これらの結果は Kirchner (2009)の手法に倣って貯留量を観測された流量を基に求めたものなのでグラフの変化は流量の変化と似た傾向を示している。

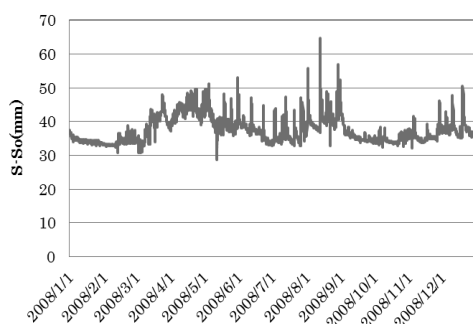


図-6 貯留量の推定結果（浅瀬石川ダム）

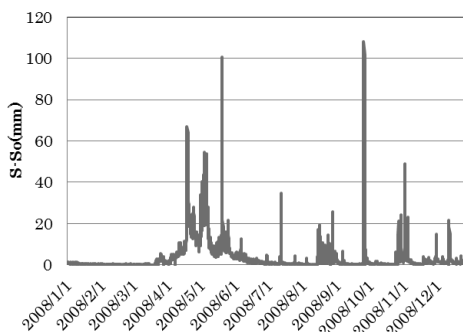


図-7 貯留量の推定結果（寒河江ダム）

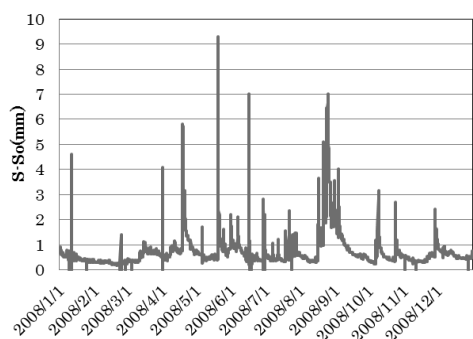


図-8 貯留量の推定結果（釜房ダム）

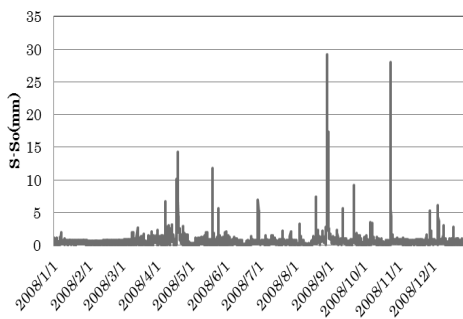


図-9 貯留量の推定結果（三春ダム）

そのため降水量の変動とも似た傾向を示している。グラフから読み取れる 2008 年の年最大の  $S-S_0$  の値は約 65mm（浅瀬石川ダム）、約 140mm（石淵ダム）、約 110mm（寒河江ダム）、約 10mm（釜房ダム）、約 30mm（三春ダム）となった。浅瀬石川ダムはほかの流域よりも大きい流量が観測されていたため、ほかの流域よりも比較的高い値をとっている。

### (3) 対象流域ごとの $S-S_0$ と $Q$ の関係性

各流域で 2006 年～2008 年の 3 年間における、求めたパラメータ  $a$ 、 $b$  と観測流量を式(8)に代入して求めた貯留量  $S-S_0$  の値と流量  $Q$  との関係を図-10～13 に示す。これらの図は、Kirchner (2009) や Teuling *et al.* (2010) の論文でも利用されているが、流域固有の貯留量と流量の関係を端的に示すものであり、これが流域の分類指標に利用できると考えている。具体的には、観測流量の最大値と対応させることで  $S-S_0$  の最大値を求める。そして求めた年間の最大値と原点で作られる長方形の縦横比を式(9)で計算し、これを貯留量・流量指標  $I_{SQ}$  と定義して流域分類の指標に利用することを著者らは提案する。ここで、 $Q_{\max}$  および  $S_{\max}$  は最大流量 (mm/h)、最大貯留量 (mm) であり、 $\Delta t$  は流域の流量観測の時間間隔 (h) である。この値は降雨流出過程において、その流域の水の流動が貯留と流出のどちらにより依存しているかを示すものである。この値が大きいほど流出しやすい流域、小さいほど貯留しやすい流域であることを示すと考えられる。図-14、15 では図-10～13 の結果から  $S_{\max}-S_{\min}$  の値と式(9)から算出した  $I_{SQ}$  について対象流域ごとに年別にまとめたものである。 $S_{\max}-S_{\min}$  の値は対象年の流量の最大値・最小値によって値に差が生じている。これは各年の降雨変動に依存している。 $I_{SQ}$  の値は  $S_{\max}-S_{\min}$  に比べて降雨量の年々変動の影響が小さいため流域の性質を評価する指標としてより適している。

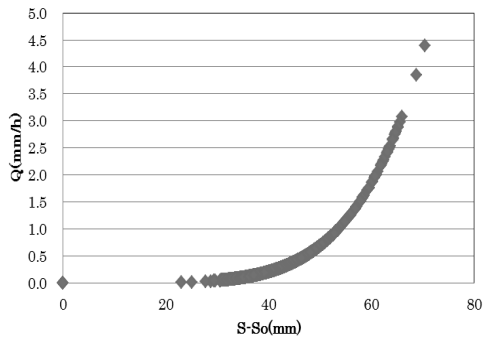


図-10 貯留量と流量の関係 (浅瀬石川ダム)

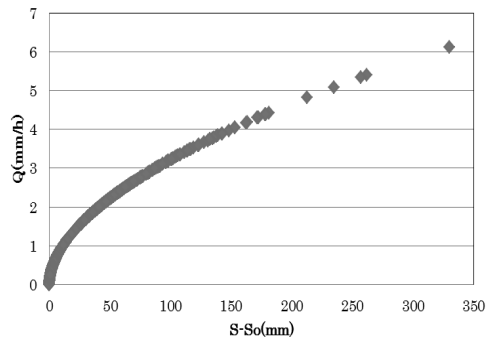


図-11 貯留量と流量の関係 (寒河江ダム)

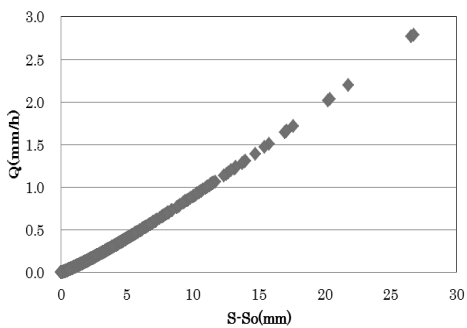


図-12 貯留量と流量の関係 (釜房ダム)

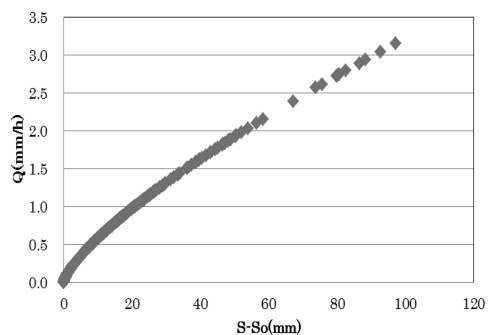
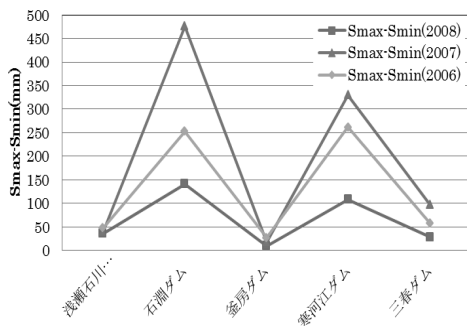
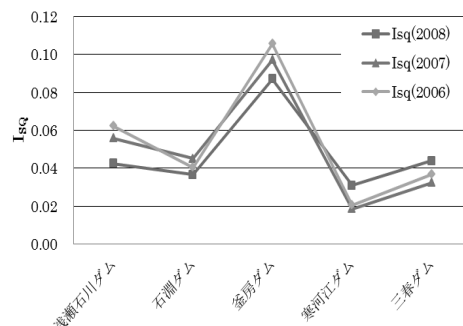


図-13 貯留量と流量の関係 (三春ダム)

図-14  $S_{\max}-S_{\min}$ の値の流域別の比較図-15 各流域で年別に算出した  $I_{SQ}$ の結果

#### 4 結論・まとめ

本研究はKirchner (2009)の手法による流域水収支に関する新しい解析手法の日本における適用可能性を検討した。その結果、Kirchner (2009)の手法の適用条件である夜間の無降雨時の流量逓減時のデータを対象として、降雨流出過程が単一の関係式で近似できる比較的単純な降雨流出過程を有す流域であると仮定した場合、日本の流域でも適用できる可能性が確認された。しかし、流域の降雨流出過程を単一の式で表現できると仮定しての結果なので、本研究の結果の妥当性については検討が必要である。流量  $Q$  と流量変動  $-dQ/dt$  の関係が単一

の関係式で表現できるかどうかについては、本手法の利用目的や求められる精度によって議論が分かると考えられる。ただし、単一の関係式で表現できるとなれば、時々刻々と変化する流域の貯留量変化が算出でき、流域の貯留と流量に関する定量的な議論が可能となる。一方、流量  $Q$  と流量変動  $-dQ/dt$  の関係が単一の関係式で表現できない場合には、Teuling *et al.* (2010)のように本手法の適用条件を緩和する手法を開発していくことが必要である。

さらに本研究は、Kirchner (2009)の手法を利用し、図-10~13 に示す流域の観測記録の最大流量とその際の貯留量の比に流量観測の時間間隔を乗じた貯留量・流量指標  $I_{SQ}$  の提案を新たに行い、この指標を流域分類に利用できる可能性を示した。貯留量・流量指標  $I_{SQ}$  を用いた流域の分類方法についてはまだ具体的な方法はまだ決めてはいないが、対象流域の地理・地質条件なども加味して結果の妥当性について追及していきたいと考えている。グルーピングする作業については、まだ東北地方のデータのみだが全国規模で  $I_{SQ}$  の算出を進めて  $I_{SQ}$  の値ごとに基準を設けて指標として使えるのではないかと考えている。今後、データを積み重ねることにより、この指標の有効性や利用上の課題を検討することが可能になると考えられる。十分に長い観測記録および式(8)を用いて算出した貯留量  $S$ - $S_0$  の時系列データと流域の過去に発生した洪水被害関係を整理すると、洪水被害を発生させない  $S$ - $S_0$  の最大値として流域の貯留能を算定することができると考えられる。そこで得られた流域の貯留能と、気象庁の「土壌雨量指数」との関係を整理解できると流域の土砂災害との関連性についても言及できる可能性がある。以上のように、本研究はKirchner (2009)の手法の日本における適用性を検討し、東北地方のダム流域にも適用できることを確認した。今後は、流量と流量変動の関係を単一の式で表現する際の精度の向上と  $S_0$  をどのように定義するのかという点についての検討が課題である。

#### 謝辞

本研究は、環境省環境研究総合推進費 S-8-1(4)、JICA/JST 地球規模課題対応国際科学技術協力事業「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(若手研究 B, 21760381)、東京大学総括プロジェクト機構「水の知」(サントリー)総括寄付講座の成果の一部である。本研究は国土交通省所管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

- 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.
- Teuling, A. J., Lehner, I., Kirchner, J. W. and Seneviratne, S. I. (2010), Catchments as simple dynamical systems: Experience from a Swiss prealpine catchment, *Water Resour. Res.*, 46, W10502, doi:10.1029/2009WR008777.