流域スケールの雨水貯留量の推定法を利用した降雨流出過程のスケール依存性の検討*

福島大学共生システム理工学類　千葉　宇彦
福島大学共生システム理工学類　横尾　善之

1. はじめに

現在の水文学において未解決の問題のうち，「空間スケール問題」は最も重要な問題である。「空間スケール問題」を包括的に取りまとめた Kalma and Sivapalan (1995) は，(1)小さな流域間に発現する降雨流出過程の多様性がより大きな空間スケールではそれらの平均的振る舞いを示す「空間代表性」が発現する「代表要素面積（Representative Elementary Area：REA）」が存在すること，(2)“流域内の主要な降雨流出過程が空間スケールの増加とともに変化する「空間スケール依存性」”が存在すること，等の極めて重要な知見を報告している。Asano and Uchida (2010)は，河川の水質データを利用して「空間スケール問題」を検討する方法を示した。しかし，現地観測研究で重要な「空間代表性」が発現する空間スケールについて未確定であり，モデリング研究で重要な降雨流出過程の空間スケール依存性の発現要因についても現在説明できていない。

降雨流出現象における空間スケール依存性を検討するには，これまでの研究では事前に降雨流出過程を主観的に決定しており，空間スケール依存性をモデル定数のみで評価してきた。一方，Kobayashi and Yokoo (2013) は，河川流量の観測データから降雨流出過程を逆推定する日野・長谷部 (1985) の成分分離と貯留量の推定の Kirchner (2009) の手法を組み合わせた手法を改良した雨水貯留量推定法（この雨水貯留量推定法の「貯留量」とは河川の地表水，地下水，土壌水分，表土の氷や積雪などをすべて含めたものを指す）を提案している。この手法には，観測データに基づいて客観的に主要な降雨流出過程を特定し，モデリングすることができる特徴があるため，空間スケール依存性をモデルの構造と定数の両方で客観的に評価をすることができる可能性がある。そこで本研究は，河川流量データから流域内の主要な降雨流出過程を抽出できるこの雨水貯留量推定法を利用して空間スケール依存性の発現要因を解明することを目指している。

2. 方法

本研究は一級河川の北上川の上流・中流・下流の流域を対象とし，流量と雨量のデータを用いた（**図-1** および**表-1**）。具体的には国土交通省の水文水質データベース（http://www1.river.go.jp/）から，流量観測所の毎時の流量データおよび雨量観測所の雨量データを 2008～2010 年の期間について取得した。

表-1　流域面積

	上流	中流	下流
流域面積	2579.8 ㎢	6398.9 ㎢	7862.5 ㎢

*Investigating scale dependency of rainfall-runoff process in terms of watershed-scale storage estimation method by Takahiko Chiba and Yoshiyuki Yokoo

日野・長谷部 (1985) が提案した成分分離手法では，まず流出高データを片対数プロットし，流出高の逓減部から傾きの異なる複数の逓減部を特定する。

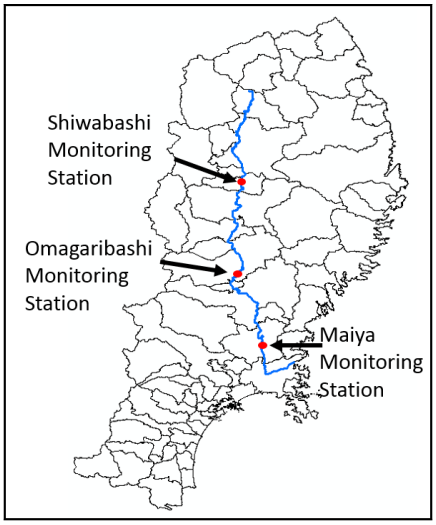
次に，この逓減部に指数関数をあてはめて逓減係数を決定し，この逓減係数の逆数である時定数 T_c を求める。ここで得られた T_c を式(1)-(2)に代入する。Tc は小数点以下を四捨五入し，整数として取り扱った。

$$c_0 = (2.1/T_c)^2 \qquad (1)$$

$$c_1 = 2.1^2/T_c \qquad (2)$$

ただし，本研究では δ =2.1 に固定している。なお，δ の値が本研究の成分分離結果にほとんど影響しないことは事前に確認している。

数値フィルターの核となる ω は次式で与える。次式の τ は数値フィルター開始からの経過時間を示す。



図−1　対象流域の位置図

$$\omega(\tau)=\begin{cases} c_0\exp\left(-\frac{c_1}{2}\tau\right)\frac{1}{\sqrt{\frac{c_1{}^2}{4}-c_0}}\sinh\left(\tau\sqrt{\frac{c_1{}^2}{4}-c_0}\right) & (\tau\geq 0) \\ 0 & (\tau<0) \end{cases} \qquad (3)$$

この式を次式に代入して遅い流出成分 Q'を分離する。成分分離前の流出高 Q と分離する流出高 Q'の差が負とならないように式(4)における重み係数 α を 0.1< α <1 の範囲で設定した。

$$Q'(t)=\alpha\sum_{\tau=0}^{k}\omega(\tau)\,Q(t-\tau) \qquad (4)$$

本研究は Kobayashi and Yokoo (2013) にならい，k は成分ごとに異なる T_c の 5 倍の値 (k=5T_c) とした。成分分離には日野・長谷部 (1985) の手法を利用したが，分離する成分数やパラメータの決定には解析者の裁量がどうしても反映されてしまう。この点については，西山・横尾 (2013) が提案した河川流量の逓減部から降雨流出過程における主要成分数を同定する方法を採用した。本研究では，河川流量逓減部の違いから，この成分分離を T_c の大きいものから順にあてはめ，上流・下流では 5 成分，中流では 4 成分に流量を分離することができた。また，河川流量の観測では，伏流水などの地下水として観測されない分が存在する。地下水として観測されない成分に関しては観測する手段がないため，その成分を無視して解析を行った。

Kobayashi and Yokoo (2013) が用いた Kirchner (2009)の手法の概略を説明する。まず式(5)で示す流域スケールの水収支式を式(6)のように代入し，貯留高と流出高の関係を導く。

$$\mathrm{d}S/\mathrm{d}t=P-ET-Q \qquad (5)$$

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}s}=\frac{\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t}{\mathrm{d}s/\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t}{P-ET-Q} \qquad (6)$$

式(6)に夜間・無降雨の条件を付すことで降雨と蒸発散量が流量よりもはるかに小さいと仮定することができ，降雨と蒸発散量を無視する。貯留高と流出高の関係は式(7)のように近似する。

$$\mathrm{g}(Q)=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}S}\approx\left.\frac{\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t}{-Q}\right|_{P\ll Q,ET\ll Q} \tag{7}$$

これにより，流域スケールの貯留高と流出高の関係が流量データのみから決定できることになる。なお，本研究では 19 時から翌日 6 時までを夜間と定義した。Kirchner (2009) は式(8)のような逓減モデルが対象流域に適用できる場合，式(7)と式(8)から式(9)の関係が導ける。

$$-\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t=aQ^b \tag{8}$$

$$\int \mathrm{d}S=\int\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{g}(Q)}\int\frac{1}{a}Q^{1-b}\mathrm{d}Q \tag{9}$$

この式(9)を積分すると，式(10)のように貯留高を計算できる。なお，a，b はパラメータである。

$$S-S_0=\frac{1}{a}\frac{1}{2-b}Q^{2-b} \tag{10}$$

ここで，S_0 は積分定数であるため，流域スケールの貯留高の絶対値はある基準面からの高さとして算出される。本研究は式(8)-(10)の b を 1 とした式(11)の線形モデルを新たに仮定する。

$$-\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t=aQ \tag{11}$$

これは，式(12)のような指数関数モデルで逓減部を表現することに相当する。

$$Q=Q_0\cdot\exp(-at) \tag{12}$$

これにより，日野・長谷部 (1985) のフィルター分離手法との論理的整合性が保持される。パラメータ a は成分分離した各流量成分に対して－dQ/dt と Q の関係を図示し，その関係を式(11)で近似することで決定した。添え字の付いた Q と S は成分分離で得られた流量とその流量を用いて求めた貯留高に相応する。

3. 結果

3.1 流量と流量減少量の関係

北上川の流域における流量と流量減少量の関係について比較を行った。**図-2～3** は成分分離で得られた各流量成分のうち夜間・無降雨時の流量逓減部のデータを用いて流出高 Q と流出高減少量 -dQ/dt の散布図を示している。図中，Q_1 が最も遅い成分であり，Q_5 が最も速い成分である。西山・横尾 (2013) が提案した河川流量の逓減部から降雨流出過程における主要成分数を同定する方法を採用したことで中流は，Q_4 が最も速い成分になった。また，基底流 Q_1 のように遅い成分ほど－dQ/dt の変動幅に比べて Q の変動幅が小さくなる傾向がある。本研究は，**図-2**，**図-4**，**図-6** の関係より線形近似を用いて式(11)のパラメータ a を成分別に決定した。決定したパラメータは**表-2** にまとめ，これらのパラメータを用いて貯留量の推定を行った。

表-2　利用したパラメータ

	上流	中流	下流
Q_1	a=0.0002	0.0005	0.0003
Q_2	a=0.0011	0.0034	0.0017
Q_3	a=0.0065	0.0137	0.0050
Q_4	a=0.0279	0.0546	0.0196
Q_5	a=0.0833		0.0603

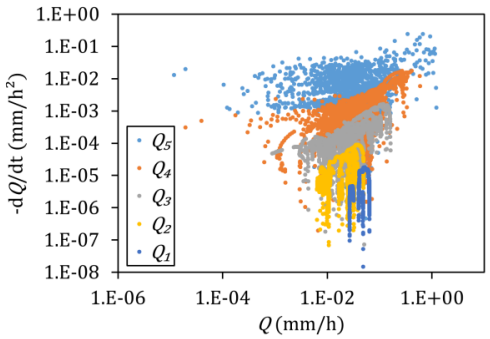


図-2　北上川(上流)の流量と流量減少量の関係

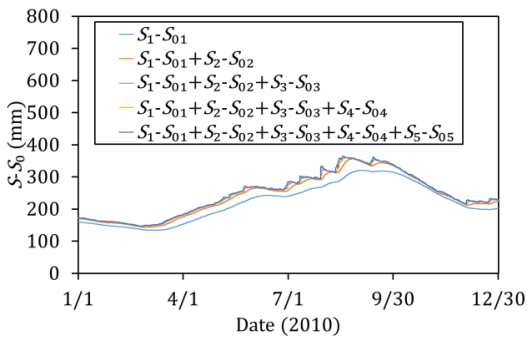


図-3　北上川(上流)の貯留量

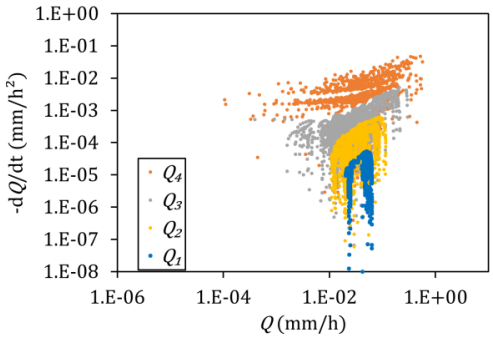


図-4　北上川(中流)の流量と流量減少量の関係

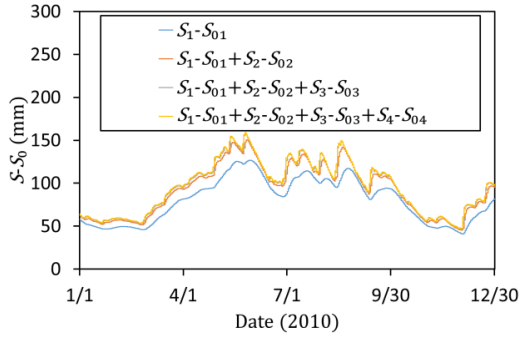


図-5　北上川(中流)の貯留量

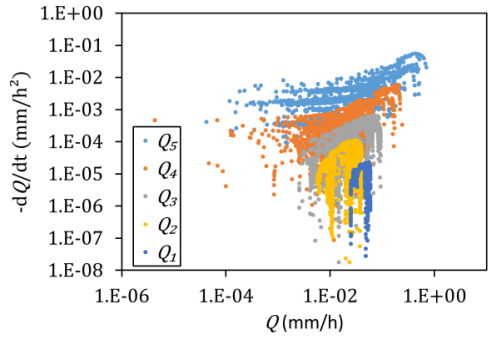


図-6　北上川(下流)の流量と流量減少量の関係

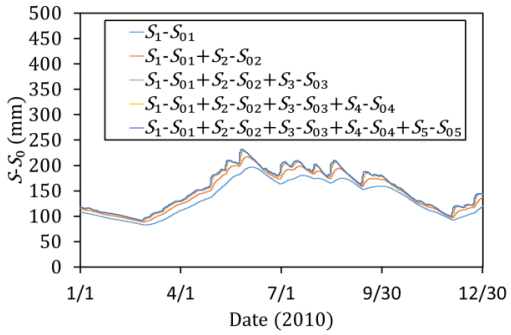


図-7　北上川(下流)の貯留量

3.2　プロセス数と時定数

上流，中流，下流における流域面積の差を区分流域面積とし表-2

表-2　区分流域面積

	上流	中流	下流
区分流域面積	2579.8 km²	3819.1 km²	1463.6 km²

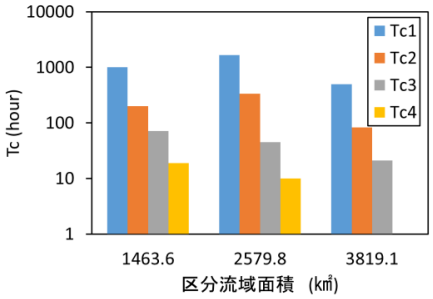


図-8　北上川の入れ子流域でのプロセス数及び Tc 結果

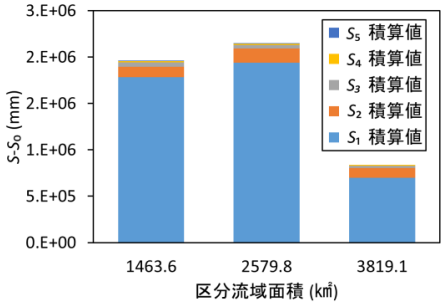


図-9　北上川流域での貯留量推定の積算値

にまとめる。**図-8** より，区分流域面積の増加に伴って T_{c3} と T_{c4} が減少し，区分流域面積 3819.1 km^2 ではプロセス数が減少することがわかる。**図-8** に示す貯留量 S-S_0 は区分流域面積 3819.1 km^2 で急激な減少が確認できた。これらのことから本研究の手法で推定するプロセス数と T_c が区分流域面積に関係している可能性がある。

4. 考察

本研究は，河川流量データから北上川流域内の主要な降雨流出過程を抽出できる可能性がある「雨水貯留量推定法」を利用して空間スケール依存性の発現要因を解明に取り組んだ。その結果，区分流域面積の増加に伴う主要な降雨流出過程のプロセス数と逓減時定数の変化を確認することができた。他の河川でも同様の結果が得られれば，モデル構造と定数の両面が空間スケール依存性に影響することを示すことができると考えられる。

しかし，空間スケールについての発現要因の可能性は示すことができたが，さらに多くの事例を検討する必要がある。特に，空間スケール依存性の発現メカニズムをより明確に解明するには，空間代表性が発現する流域面積（REA）の特定や入れ子上流域における空間スケール依存性の発現形態を確認することが求められると考えている。これに向け，まずはこれまでの既往研究をもとに空間代表性が発現する流域面積である代表要素面積（REA）を定める必要がある。Woods *et al*. (1995) は河川流量データの空間代表性を検討し，REA は 1 km^2 程度になると示している。他にも，Gomi *et al*. (2002) は有機物生産量について，Asano & Uchida (2012) はシリカ濃度について同様の報告をしている。このため，REA のサイズは 1 km^2 程度になると考えられるが，ドイツの流域の低水域のシリカ濃度に関する調査では 1~100 km^2 程度になる可能性が指摘されている。これらのことを考慮して REA のサイズ，またはサイズの範囲の特定に取り組む必要がある。REA のサイズが特定できれば，その REA を基準とし異なる流域面積の流域を含む入れ子上流域を対象に雨水貯留量推定法を適用させる。この解析を通して主要な降雨流出過程に関する空間スケール依存性の発現を，降雨流出モデルが反映する主要なプロセス数やパラメータの大きさの変化を通じて確認することができると考えられる。

5. 結論

本研究では，河川流量の観測データから降雨流出過程を逆推定する日野・長谷部 (1985) の成分分離と貯留量の推定の Kirchner (2009) の手法を用いた雨水貯留量推定法 (Kobayashi and Yokoo, 2013)を使用して空間スケール依存性の発現要因を解明することを目指した。その結果，流域面積の増加に伴う主要な降雨流出過程のプロセス数と逓減時定数の変化を確認することができた。しかし，本研究の結果では空間スケール依存性の発現要因の全容解明には至っていない。代表要素面積 (REA) と空間代表性についての発現を確認する必要があり，今後はこれらの課題について検討を進める必要があると考えられる。

謝辞

本研究は，科学研究費補助金（若手 B，24760388），環境省環境研究総合推進費 S-8-1(4)，科学研究費補助金（基盤研究 B，22360192）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

Asano, Y and Uchida T. (2010), Is representative elementary area defined by a simple mixing of variable small streams in headwater catchments?, *Hydrol. Process.*, pp.666-671.

Asano, Y. and Uchida, T. (2012), Flow path depth is th main controller of mean base flow transit times in a mountainous catchment, *Water Resour. Res.*, Vol.48, W03512, doi: 10.1029/2011WR010906.

Gomi, T., Sidle, R.C. and Richardson, J. S. (2002), Understanding processes and downstream linkages of headwater systems, *BioScience,* Vol.52, pp.905-916.

Kalma, J.D. and Sivapalan, M. (eds) (1995), *Scale issues in hydrological modelling*, John Wiley and Sons, 504 pp.

Kirchner, J.W. (2009), Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward, *Water Resour. Res.*, Vol.45, W02429, doi: 10.1029/2008WR006912.

Kobayashi, S. and Yokoo, Y. (2013), Estimating watershed-scale storage changes from hourly discharge date in mountainous humid watersheds: toward a new way of dominant process modeling, *Hydrol. Res. Lett.*, Vol.7, pp.97-103, doi: 10.3178/hrl.7.97.

Woods, R. and Sivapalan, M., (1995), Investigating the representative elementary area concept: an approach based on field data, *Hydrol. Process.*, 9,291-312.

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

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, 254 pp.