流域スケールの雨水貯留量推定法の 理論的修正とその効果

REVISION OF ESTIMATION METHOD OF WATERSHED-SCALE RAINWATER STORAGE AND ITS EFFECT

千葉宇彦¹・横尾善之²

Takahiko CHIBA and Yoshiyuki YOKOO

¹非会員 福島大学学生 共生システム理工学類 (〒960-1296 福島市金谷川1)

²正会員 博(工) 福島大学准教授 共生システム理工学類 (〒960-1296 福島市金谷川1)

This study attempted to improve a methodology for estimating watershed-scale storage changes from hourly discharge data and to verify its effect in the upper Abukuma River watershed in Japan. The previous methodology separate hydrographs into several discharge sub-components by a filter-separation method, and then it explored relationships between discharge sub-component Q and watershed-scale storage S , assuming power-law relationships between derivative of discharge sub-components dQ/dt and Q . The present study employed linear relationships between Q and S to be theoretically consistent with the filter-separation method in which linear relationships are assumed between Q and S . Based on this theoretical revision, we re-estimated watershed-scale storages to compare with those estimated by the previous methodology. As the result, we found instantaneous increases of storage after rainfall events become smaller and storage change become smoother. In addition, we confirmed the present methodology can estimates more realistic storage than previous one in terms of event-scale water balance.

Key Words : recession analysis, hydrograph separation, discharge, Abukuma River

1. 序論

本研究は、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流域内の単位面積あたりの水量のうち、最終的に河川流量観測点を通過するものを「雨水貯留量」と定義し、その推定法を議論する。流域スケールの雨水貯留量は直接的に測定することが非常に困難であるため、流域スケールの水収支式から推定されてきた¹⁾³⁾。この場合、降水量から蒸発散量および流量を差し引いた残差として貯留変動を求め、これにある基準面からの高さを加算することで貯留高に変換する。しかし、流域スケールの蒸発散量も直接的に計測することができないため、推定する他はない。一方、高精度の重力計測器を用いて貯留変動の推定が行われた例があるが、コストと技術面に課題があり、流域スケールの推定は難しいとされている⁴⁾⁵⁾。

この問題を解決できる手法としてKirchner⁶⁾は意外な方法論を紹介している。Kirchner⁶⁾は、出水後の夜間無降雨の期間であれば流域スケールの水収支のうち降水量と

蒸発散量が無視でき、流出高から貯留高の変化を直接計算し、貯留高を積分することである基準面からの高さとして貯留高を計算できることを示している。この手法は、貯留・流量関係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の流域ならば適用できる。しかし、日本流域は降雨流出過程が複雑であり、この手法を直接適用すると貯留高の推定値が不自然な変動を示すことを横尾ら⁷⁾は示している。Kirchner⁶⁾の手法の改良は他にも提案されており、例えばTeuling *et al.*⁸⁾は貯留変化と流量の関係を、流量の大きさによって場合分けして別々に決定する方法を提案している。同様の提案は、Birkel *et al.*⁹⁾やKrakauer and Temimi¹⁰⁾等によっても行われているが、これらの手法では貯留量や流量が季節変化する流域では適用するのが困難であるとMcMillan *et al.*¹¹⁾は指摘している。

この問題に対しKobayashi and Yokoo¹²⁾は、日野・長谷部¹³⁾の成分分離手法を用いて流量データを成分分離した上でKirchner⁶⁾の方法を適用すれば貯留量や流量に季節変化がある流域においても貯留高を良好に推定できることを示している。この手法を用いて土砂災害の発生と流域の雨水貯留高の関係を検討した研究も行われている¹⁴⁾¹⁵⁾。

図-1 対象流域の位置図

しかし、Kobayashi and Yokoo¹²⁾の手法は、貯留高と流出高の関係が線形であることを仮定した成分分離の結果に、その関係が非線形であることを仮定したKirchner⁹⁾の貯留量推定の式を組み合わせる点に論理的な不整合がある。そこで本研究は、貯留量と流量の非線形な関係を線形な関係に変更して論理的な不整合を取り除いた上で線形化の影響を確認し、線形化の有効性を示す。

2. 方法

(1) 対象流域および使用データ

本研究は一級河川の阿武隈川の白河流量観測所の流域を対象とした(図-1)。国土交通省の水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/>)から、白河流量観測所の毎時の流量データおよび真船雨量観測所の毎時の雨量データを2005~2007年の期間について取得した。

(2) 流量の成分分離手法

日野・長谷部¹³⁾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、流出高の通減部から傾きの異なる複数の通減部を特定する。次に、この通減部に指数関数をあてはめて通減係数を決定し、この通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。

$$c_0 = (\delta / T_c)^2 \quad (1)$$

$$c_1 = \delta^2 / T_c \quad (2)$$

ただし、本研究では T_c は小数点以下を四捨五入した整数とし、 δ は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。

$$\omega(\tau) = \begin{cases} c_0 \exp\left(-\frac{c_1 \tau}{2}\right) \sinh\left(\sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0} \cdot \tau\right) / \sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0} & (\tau > 0) \\ 0 & (\tau \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中の τ は数値フィルターの開始からの経過時間を示す。この式を次式に代入して遅い流出成分 Q' を分離する。

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

成分分離前の流出高 Q から分離後の流出高 Q' を差し引いて求めた残りの流出高が負とならないように式(4)を用いて成分分離するすべての成分において重み係数 α を $0.1 < \alpha < 1$ の範囲で設定した。本研究はKobayashi and Yokoo¹²⁾にない、 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・長谷部の手法¹³⁾を利用したが、分離する成分数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¹⁶⁾を参考に河川流量の通減時定数 T_c の対数 $\log_5 T_c$ を四捨五入した整数が変化したら降雨流出過程が変化したと仮定して主要成分数を同定する方法を採用した。これにより、本研究では、河川流量の通減部の違いから、この成分分離を T_c の大きいものから順に4回あてはめ、5成分に流量を分離した。ただし、河川流量の観測点を通過しない地下水は流動経路に関わらず無視しているため、流域内に存在するすべての降雨流出過程を表現している訳ではない。

(3) 貯留高の推定方法

Kobayashi and Yokoo¹²⁾が用いたKirchner⁹⁾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。

$$dS/dt = P - ET - Q \quad (5)$$

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

式(6)は夜間・無降雨のときのように、降雨量と蒸発散量が流量よりもはるかに小さく、降雨と蒸発散量を無視できる場合、貯留高と流出高の関係は式(7)のように近似することができる。

$$g(Q) = \frac{dQ}{dS} \approx \frac{dQ/dt}{-Q} \quad (7)$$

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。なお、本研究では夜の19時から翌日の朝の6時までを夜間と定義した。Kirchner⁹⁾は式(8)のような通減モデル¹⁷⁾が対象流域に適用できる場合、式(7)と式(8)から式(9)の関係が導けるとしている。

$$dQ/dt = -aQ^b \quad (8)$$

図-2 成分分離結果の一部

図-3 各成分における流出高と流出高変動量の関係

表-1 利用したパラメータ

	Kobayashi & Yokoo (2013)	本研究
Q_1	$a=0.0005, b=1.05$	$a=0.0005$
Q_2	$a=0.0111, b=1.48$	$a=0.0030$
Q_3	$a=0.0093, b=1.08$	$a=0.0109$
Q_4	$a=0.0129, b=0.86$	$a=0.0462$
Q_5 (線形)		$a=0.1064$
Q_5 (非線形)	$a=0.0171, b=0.52$	$a=0.0171$
		$b=0.52$

$$\int dS = \int \frac{dQ}{g(Q)} = \int \frac{1}{a} Q^{1-b} dQ \quad (9)$$

この式(9)の積分を行うと、式(10)のように貯留高を計算することができる。なお、 a 、 b はパラメータである。

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

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。以下では $S-S_0$ についてのみ言及するので、流量観測点を通過しない雨水貯留高は無視していることになる。

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。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。

$$-dQ/dt = aQ \quad (11)$$

$$Q = Q_0 \cdot \exp(-at) \quad (12)$$

これにより、日野・長谷部¹³⁾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。

3. 結果

(1) 流出高 Q と流出高変動 $-dQ/dt$ の関係

図-2のように成分分離した各成分のうち夜間・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 $-dQ/dt$ の関係をまとめたのが図-3である。成分分離した各成分に時定数が大きい順に添字の1から4を付したため、図中の Q_1 が最も遅い成分であり、 Q_5 が最も速い成分である。Kirchner⁶⁾と同様に両者の関係は累乗モデルや線形モデルで近似できるものの、データのばらつきが大きいことが分かる。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、一つの回帰モデルで両者の関係を説明できる度合いが低下することが分かる。

本研究は、図-3の关系到線形近似をあてはめて式(11)のパラメータ a を成分別に決定した。また、 Q_5 についてはKobayashi and Yokoo¹²⁾の手法で用いられた式(8)の結果と本研究で用いた式(11)の結果を比較するためにパラメータ a 、 b の値も累乗近似で求めた。決定したパラメータはKobayashi and Yokoo¹²⁾の手法で求めたパラメータとともに表-1にまとめた。

(2) Kobayashi and Yokoo¹²⁾と本研究の比較

Kobayashi and Yokoo¹²⁾は貯留高と流出高の关系到非線形モデルを仮定しているが、本研究ではすべての成分に線形モデルを仮定して貯留高の推定を行った。図-4～図-8は、Kobayashi and Yokoo¹²⁾の手法で得られた貯留高と本研究で得られた貯留高を日中や降水時を含めて比較したものである。この図から全ての成分において、Kobayashi and Yokoo¹²⁾の値が高いことがわかる。また分離時定数の小さい成分になるにつれ貯留高の本研究と既存研究の結果の差が相対的に大きくなり S_5-S_{05} では顕著に差が現れている。

(3) 貯留量推定における線形と非線形の比較

本研究は、貯留高と流出高の关系到線形モデルを仮定することで、同じく線形モデルを仮定するフィルター分離法¹³⁾との論理的整合性の維持を狙っている。このため、式(7)から流出高と流出高変動の关系到も線形モデルを仮定している。しかし、最後の成分分離を行った際の残流量である Q_5 に限っては数値フィルターを通していないため、流出高と流出高変動の关系到に線形と非線形のどちらのモデルを採用しても論理的な不整合はない。そこで、 Q_5 におけるパラメータは、線形と非線形の両方のモデル

図-4 本研究とKobayashi and Yokoo¹²⁾の貯留高の推定値 $S_1 - S_{01}$ の比較

図-8 本研究とKobayashi and Yokoo¹²⁾の貯留高の推定値 $S_5 - S_{05}$ の比較

図-5 本研究とKobayashi and Yokoo¹²⁾の貯留高の推定値 $S_2 - S_{02}$ の比較

図-10 Kobayashi and Yokoo¹²⁾の手法での結果と Q_5 のみを非線形モデルを適用して計算した貯留高積算値

図-6 本研究とKobayashi and Yokoo¹²⁾の貯留高の推定値 $S_3 - S_{03}$ の比較

図-7 本研究とKobayashi and Yokoo¹²⁾の貯留高の推定値 $S_4 - S_{04}$ の比較

を用いて貯留高の推定結果を比較した結果を図-9（全て線形）と図-10（ Q_5 のみ非線形）に示す。両図とも、Kobayashi and Yokoo¹²⁾の手法による貯留量の推定値を比較のために併記した。これらの図から、いずれの手法でも貯留量の季節的変動が確認できるが、Kobayashi and Yokoo¹²⁾の手法よりも本研究の値が一貫して低くなる傾向があることが分かる。さらに Q_5 に線形と非線形のモデルをあてはめた本研究の結果を比較すると、線形モデルでは降雨による瞬間的な貯留高の大きな上昇は確認できないが、非線形モデルではそれが確認できる。

図-11 2006/12/26 9:00～2006 / 12/27 5:00 の期間の総雨量および線形モデルと非線形モデルを適用して求めた貯留量 S_5-S_{05} の変動量

本研究はさらに Q_5 の貯留量の推定に用いるモデルとしての線形モデルと非線形モデルの優劣を判断するため、1降雨イベントの水収支を計算した。対象としたのは、2006/12/26 9:00に開始し、2006/12/27 6:00に終了した降雨イベントである。この期間に対象期間中に最も大きく Q_5 の貯留高が上昇している。貯留高の推定値が最大になったのは両モデルともに 2006/12/27 5:00 であった。そこで降雨発生時から貯留高の推定値が最大になるまでの貯留高の変動量とその期間の総雨量を比較した（図-11）。この図より線形モデルで S_5-S_{05} を求めた場合の貯留高の変動量は総雨量(mm)よりも少なくなり、非線形モデルで S_5-S_{05} を求めた場合は貯留量の変動量が総雨量よりも約3倍大きいことが分かった。総雨量よりも貯留量の変動量の方が大きいということは水収支的には整合性が維持されないため、 Q_5 に対しても線形モデルを適用する方がよいと考えられる。

4. 考察

本研究は、Kobayashi and Yokoo¹²⁾が日野・長谷部¹³⁾の成分分離法とKirchner⁶⁾の理論を組み合わせで提案した雨水貯留量推定法における理論的な不整合を取り除き、その有効性を示したが、まだ課題が残されている。

まず、本研究では貯留高の推定値の妥当性についての直接的な検討は行っていない。しかし、この点については本研究と類似した手法を採用したYokoo *et al.*¹⁴⁾や小林・横尾¹⁵⁾が、流出高と流出高変動の係数に非線形モデルを仮定したもの、Ishihara and Kobatake¹⁸⁾のタンクモデル構築法を基礎とした土壌雨量指数¹⁹⁾と流域スケールの雨水貯留高の推定値との比較を行い、貯留高の値と土砂災害との明確な関係性を見出している。このため、本研究の推定値も土壌雨量指数とよく対応し、土砂災害の関係性を議論できる程度にはその妥当性があると考えられる。さらに妥当性を追求するには、対象とする空間スケールは大きくなるものの、現地観測による貯留量変動

⁴⁵⁾の推定値と比較することも必要かもしれない。しかし、それにはまず世界の主要河川流域の空間スケールでの雨水貯留量を推定する方法論を検討する必要がある。

さらに、Milly²⁰⁾のように気候条件と降雨流出プロセスの貯留量の関係、Bishop *et al.*²¹⁾のように地質と貯留量の関係、Soulsby *et al.*²²⁾のように現地観測による雨水の滞留時間と貯留量の関係、MacDonald *et al.*²³⁾のような既存の貯留量の空間分布の推定値との関係などについて検討できれば、貯留・流出プロセスの解明と貯留高の定量的把握をより一層深めることができると考えている。

上述のように、本研究が改良した流域スケールの雨水貯留量の推定法にはまだ課題が残されているが、“河川流量データに基づく主要な降雨流出過程のモデリング手法”としては大きな可能性を秘めているのではないだろうか。観測データに基づくモデル構築法の重要性は解かれている²⁴⁾が、流量データから流域内の降雨流出過程をここまで表現できる方法は見当たらない。特に、西山・横尾¹⁶⁾の考え方を参考に、流量データの逓減時定数の対数を利用して降雨流出過程の切り替わりを客観的に特定できる点は、未だ解決されていない“主要なプロセス”の特定方法²⁵⁾としても非常に有効であると考えられ、今後の発展が期待できる。

5. 結論

本研究は、貯留量と流量の係数に線形モデルを仮定する日野・長谷部¹³⁾の成分分離法から得られた各流出成分に、その係数に非線形（累乗）モデルを仮定しているKirchner⁶⁾の手法をあてはめることで流域スケールの雨水貯留高を推定しているKobayashi and Yokoo¹²⁾の方法論の論理的な不整合（線形モデルを仮定した成分分離結果に非線形モデルをあてはめること）の改善法を検討した。具体的には、貯留高と流出高の係数に線形モデルをあてはめて論理的不整合を取り除き、貯留高の推定結果の妥当性を検討した。ただし、論理的には線形モデルを仮定する必要がない最も降雨に対する応答が速い成分については線形と非線形の2つのモデルをあてはめて、水収支の観点からどちらのモデルがよいかについても検討を行った。その結果、最も降雨に対する応答が速い成分を含めてすべて線形モデルをあてはめる方が良いとの結論に至った。しかし、論理的不整合の除去とその影響評価に検討の重点を置いたため、どんな場合にもすべての成分に線形モデルをあてはめるべきかとの問いに対する答えを導くには至っていない。また、本研究で検討した手法にはまだいくつかの課題が残されていることを議論した。今後は、これらの課題についての検討を進める必要があると考えられる。

謝辞：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/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、本研究は国土交通省の水文水質データベース、数値地図情報を活用した。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) Norman, E.P.: Water storage at the Panola Mountain Research Watershed, Georgia, USA, *Hydrol. Process.*, Vol.25, pp.3878–3889, doi: 10.1002/hyp.8334, 2011.
- 2) Sayama, T., McDonnell, J.J., Dhakal, A. and Sullivan, K.: How much water can a watershed store?, *Hydrol. Process.*, Vol.25, pp.3899–3908, doi: 10.1002/hyp.8288, 2011.
- 3) Birkel, C., Soulsby, C. and Tetzlaff, D.: Modelling catchment-scale water storage dynamics: reconciling dynamic storage with tracer-inferred passive storage, *Hydrol. Process.*, Vol.25, pp.3924–3936, doi: 10.1002/hyp.8201, 2011.
- 4) Creutzfeldt, B., Ferré, T., Troch, P., Merz, B., Wziontek, H., and Güntner A.: Total water storage dynamics in response to climate variability and extremes: Inference from long-term terrestrial gravity measurement, *J. Geophys. Res.*, 117, D08112, doi:10.1029/2011JD016472, 2012
- 5) Benjamin, C., Peter A. T., Andreas G., Ty P. A. F., Thomas, G. and Bruno, M.: Storage-discharge relationships at different catchment scales based on local high-precision gravimetry, *Hydrol. Process.*, doi: 10.1002/hyp.9689, 2013.
- 6) Kirchner, J.W.: Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward, *Water Resour. Res.*, Vol.45, W02429, doi: 10.1029/2008WR006912, 2009.
- 7) 横尾善之, 小林秀平, 川崎雅俊: 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, 2012.
- 8) Teuling, A.J., Lehner, I., Kirchner, J.W. and Seneviratne, S.I.: Catchments as simple dynamical systems: Experience from a Swiss prealpine catchment, *Water Resour. Res.*, Vol.46, W10502, doi: 10.1029/2009WR008777, 2010.
- 9) Birkel, C., Soulsby, C. and Tetzlaff, D.: Modelling catchment-scale water storage dynamics: reconciling dynamic storage with tracer-inferred passive storage, *Hydrol. Process.*, Vol.25, pp.3924–3936, doi: 10.1002/hyp.8201, 2011.
- 10) Krakauer, N.Y. and Temimi, M.: Stream recession curves and storage variability in small watershed, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol.15, pp.2377–2389, doi: 10.5194/hess-15-2377-2011.
- 11) McMillan, H.K., Clark, M.P., Bowden, W.B., Duncan, M., Woods, R.A.: Hydrological field data from a modeller's perspective: Part 1. Diagnostic tests for model structure, *Hydrol. Process.*, Vol.25, pp.511–522, doi: 10.1002/hyp.7841, 2011.
- 12) Kobayashi, S. and Yokoo, Y.: Estimating watershed-scale storage changes from hourly discharge data in mountainous humid watersheds: toward a new way of dominant process modeling, *Hydrol. Res. Lett.*, Vol.7, pp.97–103, 2013, doi: 10.3178/hrl.7.97.
- 13) 日野幹雄, 長谷部正彦: 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, 第 324 号, pp.83–94, 1982.
- 14) Yokoo, Y., Wattanakarn, C., Wattanakarn, S., Semcharoen, V., Promasakha na Sakolnakhon, K., and Soralump, S.: Storage under the 2011 Chao Phraya river flood: An interpretation of watershed-scale storage changes at two neighboring mountainous watersheds in northern Thailand, *Hydrol. Res. Lett.*, 8, 1–8, doi: 10.3178/hrl.8.1, 2014.
- 15) 小林秀平, 横尾善之: 土壌雨量指数と流域スケールの雨水貯留量の推定値との関係, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_349–I_354, 2014.
- 16) 西山光, 横尾善之: 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, 2013.
- 17) Brutsaert, W. and Nieber, J.: Regionalized Drought Flow Hydrographs From a Mature Glaciated Plateau, *Water Resour. Res.*, Vol.13, pp.637–643, doi: 10.1029/WR013i003p00637, 1977.
- 18) Ishihara, Y. and Kobatake, S.: Runoff Model for Flood Forecasting, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, Vol.29, pp.27–43, 1979.
- 19) 岡田憲治, 牧原康隆, 新保明彦, 永田和彦, 国次雅司, 斉藤清: 土壌雨量指数, 天気, Vol.48, pp.349–356, 2001.
- 20) Milly, P.C.D.: Climate, interseasonal storage of soil water, and the annual water balance, *Adv. Water Resour.*, Vol.17, pp.19–24, 1994.
- 21) Bishop, K., Seibert, J., Nyberg, L., and Rodhe, A.: Water storage in a till catchment. II: Implications of transmissivity feedback for flow paths and turnover times, *Hydrol. Process.*, Vol.25, pp.3950–3959, doi: 10.1002/hyp.8355, 2011.
- 22) Soulsby, C., Piegat, K., Seibert, J. and Tetzlaff, D.: Catchment-scale estimates of flow path partitioning and water storage based on transit time and runoff modeling, *Hydrol. Process.*, Vol.25, pp.3960–3976, doi: 10.1002/hyp.8324, 2011.
- 23) MacDonald, A.M., Bonsor, H.C., Dochartaigh, B.E.O., and Taylor, R.G.: Quantitative maps of groundwater resources in Africa, *Environ. Res. Lett.* Vol.7, 024009, doi: 10.1088/1748-9326/7/2/024009, 2012.
- 24) Sivakumar, B. and Berndtsson R. (eds): *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*, World Scientific, Singapore, 544pp, 2010.
- 25) Sivakumar, B.: Dominant processes concept in hydrology: moving forward, *Hydrol. Process.*, Vol.18, pp. 2349–2353, 2004.

(2014. 9. 30受付)