

東北地方における土砂災害発生時の 流域スケールの雨水貯留量に関する検討

福島大学共生システム理工学類 阿部 伸太郎
福島大学共生システム理工学類 横尾 善之

1. はじめに

土砂災害と流域の貯留量との関係についてこれまではタンクモデルから土壌雨量指数として推定されてきたが、パラメータの決定が難しいため全国一律で計算されており、不確実性があると考えられている。この問題点を解決する方法として、まず、パラメータ少ない上に、多くの研究分野で用いられている自己回帰分析法 (AR 法) である Hino & Hasebe (1985) の成分分離の手法を用いた。そして、降雨流出過程を成分分離した上で、Kirchner (2009) の方法を適用した。しかし、この貯留量推定法は日本の流域に適用できないことから成分分離の手法を用いて降雨流出過程を成分分離した上で Kirchner (2009) の方法を適用すれば貯留量を良好に推定できることを示した Kobayashi & Yokoo (2013) や貯留量と流量の非線形な関係を線形なものに変更し、論理的不整合を排除した貯留量の推定法の開発した千葉・横尾 (2015) によって研究されている。そこで、本研究ではこれらの研究を応用させることで、土砂災害について新たな関係性を見出すのが主な目的である。

2. 方法

過去に土砂災害が発生した一級河川の流域を対象とし、国土交通省の水文水質データベースから、流量データおよび雨量データを発生した年とその過去 2 年の合計 3 年分を取得した。これは初期値の影響を受けるのを防ぐためである。Hino & Hasebe (1984) が提案した手法である成分分離を行うため、まず流出高データを片対数プロットし、図 1 のように流出高の通減部から傾きの異なる複数の通減部を特定し、図 2 のように成分分離した。

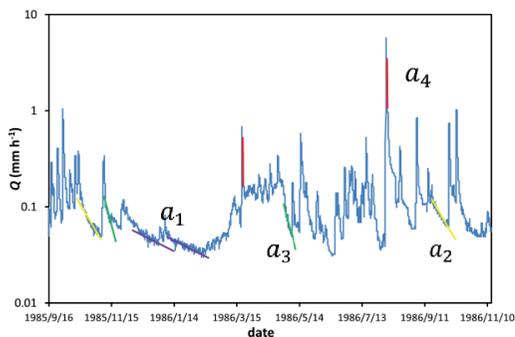


図 1 ハイドログラフと通減部の傾き

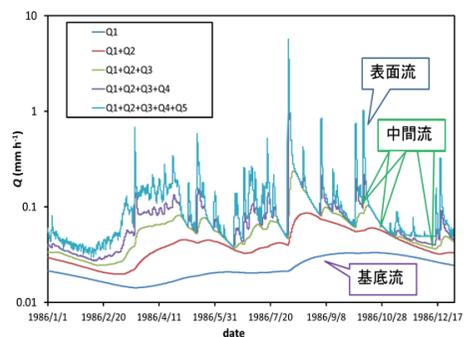


図 2 傾きと流出の関係

次に、この通減部に指数関数をあてはめ、通減係数の逆数の式(1)から時定数を求めた。

$$T_c = 1/a \quad (1)$$

求めた時定数から(2), (3), (4)の式からパラメータを導いた。

$$c_0 = (2.1/T_c)^2 \quad (2)$$

$$c_1 = 2.1^2/T_c \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{c_1}{4}} - c_0 \quad (4)$$

さらに、算出したパラメータをもとに計算するための数値フィルター(5)を作成した。

$$\omega(\tau) = \begin{cases} c_0 \exp\left(-\frac{c_1}{2}\tau\right) \frac{1}{\beta} \sinh(\beta\tau) & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases} \quad (5)$$

求めた数値フィルター ω を式(6)に代入し流出成分が遅い成分を分離した。

$$Q'(t) = \alpha \sum \omega(\tau) Q(t-\tau) \quad (6)$$

ここで α は $0.1 \leq \alpha \leq 1$ の範囲で調整した。求めた成分を全体の流量から引いて残流量を求め、次に傾きの小さい成分で分離した。最も流出成分が遅い成分は、残流量が負の値とならないように α の値を決めた。

次に千葉・横尾(2015)にならい、雨水貯留量を以下の手順で推定した。まず式(7)で表される水収支式を式(8)のように代入し貯留量 S と流量 Q の関係を導いた。

$$dS/dt = P - ET - Q \quad (7)$$

$$\frac{dQ}{ds} = \frac{dQ/dt}{ds/dt} = \frac{dQ/dt}{P - ET - Q} \quad (8)$$

式(8)に夜間・無降雨条件下で適用することで降雨 P と蒸発散量 ET 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0として無視できる。したがって、貯留量および流量の関係は式(9)のように近似できる。

$$g(Q) = \frac{dQ}{ds} \approx \frac{dQ/dt}{-Q} \quad (9)$$

Kirchner (2009) は式(10)のようなモデルが対象流域に適用できる場合、式(9)と式(10)から式(11)の関係が導けることを確認している。式(11)を積分すると式(12)のように貯留量を算出できる。 S_0 は積分定数であるため、ある基準からの貯留量として表される。

$$dQ/dt = -aQ^b \quad (10)$$

$$\int dS = \int \frac{dQ}{g(Q)} = \int \frac{1}{a} Q^{1-b} dQ \quad (11)$$

$$S - S_0 = \frac{1}{a^{2-b}} Q^{2-b} \quad (12)$$

本研究では、千葉・横尾 (2015) にしたがって、式(10)-(12)に $b=1$ を代入した式(13)の線形モデルを仮定する。これは、Hino & Hasebe (1984) の手法で推定した各成分が S - Q 関係に線形モデルを仮定していることとの整合性を保つためである。

$$dQ/dt = -aQ \quad (13)$$

なお、求まる貯留量は、ある基準面からの高さとして計算されるため、実際の貯留量や貯留高を計算できる訳ではない。しかし、土砂災害に関しては、貯留量の絶対値よりもその変化が重要であるため、この点は問題にならない。

本手法によって推定した雨水貯留量が自裁の土砂災害時にどのように変化しているのかについて調べるため、土砂災害の履歴データは国土交通省砂防部が発生後に対策を講じた内容をホームページ上で公開しているものを利用した。その後、土砂災害が発生したと考えられる時間帯の成分別貯留量と時間積算雨量の関係を精査した。

3. 結果

土砂災害の発生と貯留量についての関係性において、積算の降水量との関係を考えると、発生する前は中間流よりも表面流のほうが、一方で、発生後には表面流よりも中間流のほうが同期していること分かった。表面流のほうが降雨に対する反応が鋭敏であり、降雨がなくなると反応がすぐに定常状態に戻る。一方で、中間流では降雨に対する反応は表面流に比べて遅いものの、積算降水量と同調して変化しており、降雨が止んだ後も反応している。また、土砂災害が発生した後しばらくの間は積算雨量と貯留量が増加していることが分かった。今回の研究を踏まえると、急な激しい降雨の場合には表面流を短期的に、断続的に降り続く場合には中間流を長期的にみるべきではないかと考える。

3.1 福島県須賀川市の阿武隈川 (1998年8月豪雨)

上のグラフからは 1998 年 8 月に発生した記録的豪雨の際の福島県須賀川市の阿武隈川の観測データをもとに作成したものである。福島県南部を中心に大きな被害をもたらし、堤防の決壊や土砂災害が発生した。赤い点線は土砂災害が発生し始めたと考えられる推定の時刻を表している。

図 3 のグラフから 8 月 27 日から 28 日にかけて断続的に雨が降り続け、流量のピークを迎えていることが分かる。貯留量についても図 4 のグラフから大きく増加していることが読み取れる。地下水を成分別に分けた図 5 からは 8 月 27 日を境に各成分ともに増加していることと中間流である S2 と S3 の成分の増加量が他の成分に比べて顕著であることが特徴的である。さらに、表面に近い成分と発生する前の降り始めからの積算雨量との関係を表した図 6 では、雨が強くなってから約 10 時間後に発生しており、発生後も積算雨量と貯留量ともに増加し続けていることが分かる。また、降り始めから 1 日までは S4 の成分が積算雨量と同期していたのに対し、それ以降はより深い S3 の成分が同期していることが読み取れる。

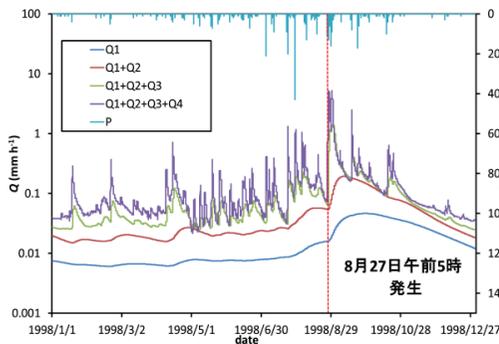


図 3 成分分離結果

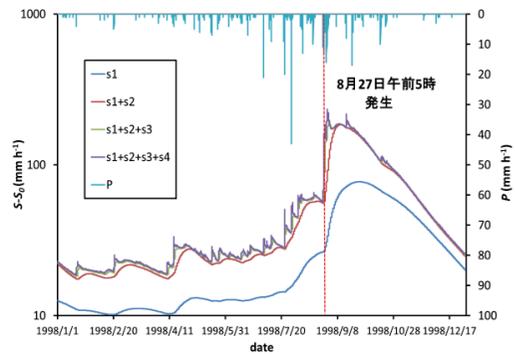


図 4 貯留量推定結果

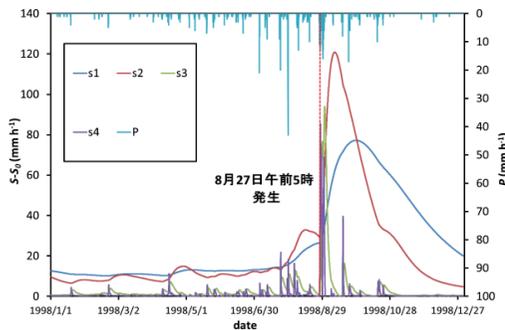


図 5 成分別の貯留量推定結果

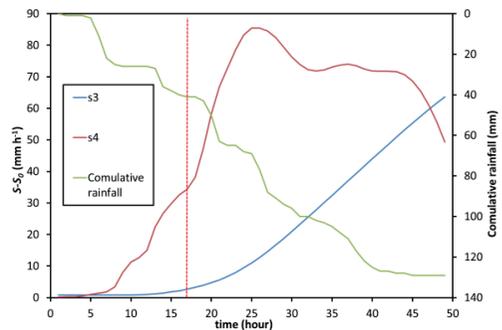


図 6 積算雨量との関係

3.2 山形県鶴岡市の赤川流域 (2007年6月27日未明に発生)

また、上のグラフは2007年に山形県鶴岡市で発生した土砂災害のときの赤川の観測データをもとに作成したものである。グラフの全体的な特徴として、日本列島の日本海側に位置していることから、降雪量が多いため、冬季の流量と貯留量が多いことが挙げられる。そのため、それぞれのピークが雪解け後の4~5月にあることが読み取れる(図7)。今回の土砂災害はまだ雪解けによる流量が多い状態が続いているところに、大雨が降ったという状況である。雨量が極端に多いわけではないにもかかわらず、土砂災害が発生している(図8)ことから地下水の量が多い状態であったことが考えられる。

図9からは中間流であるS2の成分の変動が特に激しいのが特徴であることと各成分も土砂災害の発生時がピークではないことが明らかである。さらに図10からは雨が強くなるとほぼ同時に発生しており、降り始めからおよそ10時間まではS4が、それ以降はS3が積算雨量と同期しており、発生後もともにしばらくの間増加し続けていることが分かる。

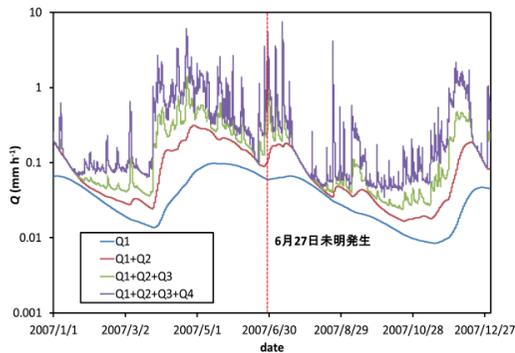


図7 成分分離結果

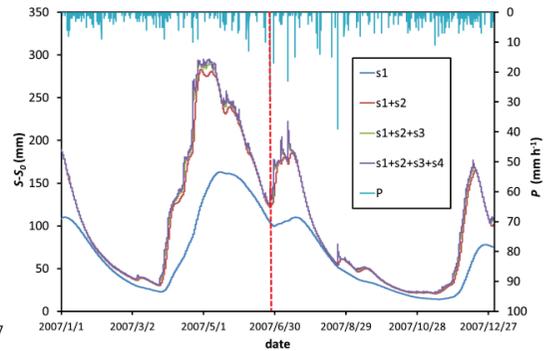


図8 貯留量推定結果

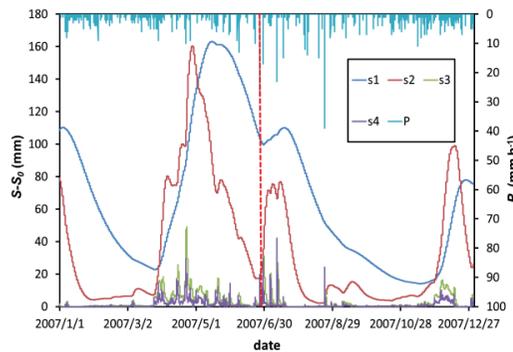


図9 成分別の貯留量推定結果

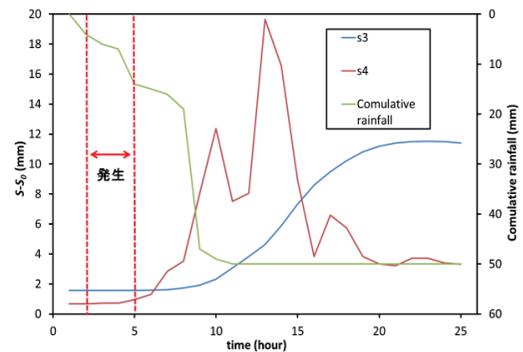


図10 積算雨量との関係

4. まとめ

土砂災害は地震や火山と異なり、何時にどこで発生したのかを正確に観測することが難しいのが大きな問題であり、それゆえに、発生を予測することはさらに難しいことである。これまでの研究ではタンクモデルを元にした土壌雨量指数が一般的であり、そこから土砂災害の発生危険性を算出しているが、パラメータの決定が困難であることに加えて、未だに、人的被害が全国で多数出ていることから十分であるとはいえない。そこで、今回、地下水を成分分離によって表面流、中間流、基底流にわけて、貯留量を推定するという過去に例のない手法によって、土砂災害という現象の把握のためのアプローチを試みた。

結果を踏まえたうえで、考察を行うと、土砂災害の発生には貯留量の急激な変化、特に、表面流と中間流の急激な増加が関係していることがいえる。必ずしも全成分の貯留量の和が多いときに発生するのではなく、その増加の傾きが急な場合に発生する傾向にある。特に、断続的に雨が降り続いた後に、激しい雨が降ると、たとえ少しの雨でも、発生することがある。近年では、所謂ゲリラ豪雨と呼ばれる短期間に猛烈な雨が降る現象が全国各地で、多発していることから、梅雨の時期や夏から秋にかけて断続的に雨が降る時期はより土砂災害の発生危険性が高まっていることが明らかである。

今回で用いた成分分離のメリットは解析のためのパラメータの決定がタンクモデルに比べて容易であることと、ハイドログラフによってその河川流域の特徴が読み取れることにある。タンクモデルでは雨量データの他にも、傾きや透水係数などの様々な要素を組み込むために多くのパラメータの決定が必要となるが、成分分離の場合にはそれらの要素はすべて流量データに含まれていると仮定したうえで、解析を行っているため、流出特性という現象の把握という観点からすると非常に優れているといえる。

今後の課題としては、土砂災害の発生流域の解析をより多くの地点で行うことと、結果に対して、今回の表面流と中間流だけではなく、また、さまざまな異なったアプローチによって新たな気付きがあれば良いと考えている。

参考文献

- Hino, M., Hasebe, M. (1984) Identification and prediction of nonlinear hydrologic systems by the filter-separation autoregressive (AR) method: Extension to hourly hydrologic data, *Journal of Hydrology*, 68, 181-210. DOI: 10.1016/0022-1694(84)90211-7.
- Kirchner, J. W. (2009) Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-modeling, and doing hydrology backward, *Water Resource Research*, 45, W02429, DOI: 29/2008WR006912.
- Kobayashi, S., Yokoo, Y. (2013) Estimating watershed-scale storage changes from hourly discharge data in mountainous humid watersheds: toward a new way of dominant process modeling, *Hydrological Research Letters*, 7, 97-103, DOI: 10.3178/hrl.7.97.
- 千葉宇彦, 横尾善之(2015) 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, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71, No.4, I_289-I_294.