体積含水率を用いた土壌雨量指数のパラメータ同定の正規化による手法

立命館大学・衣笠総合研究機構　○林 祐妃
立命館大学・理工学部　藤本将光　里深好文
京都大学大学院・工学研究科　宮崎祐輔　岸田 潔
関西大学・社会安全学部　小山倫史

1. はじめに

豪雨時の斜面崩壊や土砂流出の危険性が高い国道における通行止めの規制は，連続雨量を基準として行われているため，降雨が土壌中に浸透する特性に応じた規制ができていないのが現状である。一方で，日本各地の気象台が発表する土砂災害に関する警戒情報は，土壌雨量指数[1]と時間雨量を判断基準としている。土壌雨量指数では雨量データの情報を基に土壌中の水分状況を推定する。土壌の特性は花崗岩質土壌を対象として決定したパラメータで代表させている。しかし，日本では多種多様な地形，地質構造，土質・岩質を持つ山地で崩壊が起きており，土壌雨量指数をそのまま用いた場合，このような複雑な自然に対応したきめ細やかな通行規制の発令に適応できないのが現状である。従って，多様な自然条件に合った土壌雨量指数の算定方法を構築することが必要である。林ら[2]は土壌雨量指数の最上段タンクの貯留高の時系列データを飽和度の時系列データに一致させることでパラメータを同定する手法を提案した。飽和度は体積含水率から求められるので，比較的簡易に取得することが可能である。しかし，この手法で求めたパラメータでは土壌雨量指数を上手く表現できず精度の高い警報発令には至らないといった問題点があった。この原因としては，貯留高と飽和度の分布関数や範囲が異なるためであることが考えられる。そこで，本研究では体積含水率と貯留高の分布関数を変換し正規化を行うことで分布形式と範囲をそろえ，その上で土壌雨量指数のパラメータを同定する手法を開発することを目的とした。

2. 手法

2.1 観測の概要

本研究は兵庫国道事務所管内の国道 28 号炬口の斜面にて観測を行った。炬口の基岩は花崗岩であり，植生は雑木林である。標高についてはおよそ 70m である。この斜面においてプロットを一つ設けた。プロットにおいて体積含水率のモニタリングを行った。そのためトレンチを切り，次に地表面から 100cm の深さに TDR（Time Domain Reflectometry）式土壌水分計 CS655（Campbell 社）を挿入した。データは 1 時間毎に観測した。

降雨データも炬口のプロットで計測した。しかし炬口の雨量データには，不備がある部分があったので洲本市の気象庁雨量データを断片的に用いて解析を行った。降雨データも解析には 1 時間データを用いた。雨量データを用いて直列 3 段タンクモデルで表される土壌雨量指数の 3 つのタンク貯留高とその総和を算出した。

2.2 正規化による土壌雨量指数のパラメータの同定手法

図-1 に示した手順で，タンク貯留高とその総和の時系列データを正規化し，正規化した体積含水率の時系列データにフィッティングすることで，パラメータを同定した。土壌雨量指数を表す 3 つのタンクはそれぞれ流出係数，流出孔の高さ，浸透係数のパラメータを持っており，タンク貯留高（上から順に S1，S2，S3）を決定する。また 3 つの貯留高の総和が土壌雨量指数（SWI）と定義される。この 4 つ指標（S1，S2，S3，SWI）のうち，どの指標から尤もらしいパラメータを同定できるかを検討した。また，貯留高や体積含水率が対数的に分布するものとして扱った方が良いのかについても検討を行った。

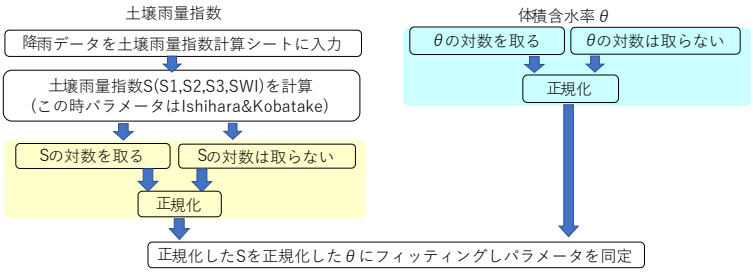

図-1　提案したパラメータ同定手法の概要

このため，まず 2 つの時系列データの対数を取った手法，取らなかった手法の 2×2 通りの同定方法を設定した。その後に正規化を行った。フィッティングするデータは S1，S2，S3，SWI の時系列データの 4 つとした。すなわち，2×2×4 の合計 16 ケースのフィッティングを行った。

本紙では，正規化手法として標準化（Z-score normalization）を採用した結果を示す。標準化はデータをその平均値で引き，標準偏差で割る正規化手法である。標準化の特徴は，データの平均値が 0 で標準偏差は 1 の標準正規分布に変換できることである。

フィッティングの際は，RMSE（Root Mean Square Error）を目的関数とした。精度の判定には NSE[3]（Nash Sutcliffe Efficiency）を用いた。RMSE を最小化することは NSE を最大化することと等価である。

以上の計算は Excel の表計算シートを用いて行った。また，フィッティングは Excel のソルバー機能を用いて実施した。

3. 結果と考察

3.1 フィッティングの精度

フィッティングの精度を検証するため RMSE と NSE の値を表-1 にまとめた。NSE は 1 に近いほど計算値の再現精度が高く，0.7 を超えた場合，再現性が良好であると判断される。そこで，分かりやすくするため表-1 において NSE が 0.7 以上のケースに色を付けた。また，表-1 の左端に示した貯留高の名称は体積含水率にフィッティングした貯留高を示している。結果を見ると S1 と SWI を体積含水率にフィッティングした場合，すべてのケースで NSE が 0.7 を超えておりフィッティング精度が高いこ

とを示している。S1 の精度が高いのは，体積含水率の上昇のタイミングやピーク値が S1 の曲線の特徴と似ているからであると考えられる。また，SWI の精度が高かったのは，最適化の際に変化させるパラメータの数が多いためである。フィッティングした結果 NSE が 0.7 を超えなかったケースはパラメータを同定する手法として相応しくないと判断した。

3.2 土壌雨量指数の時系列

フィッティングにより同定したパラメータを用いて土壌雨量指数の時系列を求め，パラメータの妥当性を検討した。紙面の制約上，フィッティング結果のすべてを示すのは無理なので例を図-2 に示す。S1 をフィッティングしたケースである図-2(a)から，S1，S2，S3 の成分がそれぞれ個別に変動しており，その総和として土壌雨量指数が成り立っていることが分かる。一方で S2 の ZLθ (図-2(b)) はフィッティングした S2 の値が SWI の成分としてほとんどの値を支配しているため，S3 の SWI への寄与率は低くなっている。S3 の ZLθ ((図-2(c)) はそれぞれの貯留高の寄与率は低くないものの，S3 の値の変動量が小さく，直線状になっている。以上の図-2(b)，(c)に示した様に寄与率あるいは変動量が小さい貯留高があるケースは上手く土壌雨量指数が機能していないケースとした。

3.3 スネーク曲線

同定したパラメータを用いてスネーク曲線を描き，パラメータの妥当性を検討した。結果の例を図-3 に示す。S1 の ZLL と S1 の ZLS1（図-3(a),(b)）ともに Ishihara&Kobatake[1]のパラメータを用いた時と同様に，二度目の降雨で土壌雨量指数が大きい方に移動し別の山をなしている。この様にスネーク曲線では，先行降雨で大きくなった S2 や S3 が土壌雨量指数を増大させ次の降雨でのスネーク曲線を右へシフトさせる。この性質により，土壌中の水分状況の特徴をうまく反映することができると考えられる。一方で，図-3(c),(d)に示した様に S1 の ZLθ と S1 の ZN のスネーク曲線では，山が重なり、土壌雨量指数の特徴を生かせていないとした。すべてのケースでスネーク曲線を描き，以上の基準で相応しいスネーク曲線を描けたかどうかを判断した。

3.4 まとめ

フィッティングの精度，土壌雨量指数の時系列，スネーク曲線の 3 つの観点からパラメータの妥当性を検討した結果，S1 の ZLL と S1 の ZLS1 の 2 つのみが基準を満たしていることが分かった。両方とも S1 の対数を取り正規化しフィッティングした手法である。これは，S1 が偏った分布をしており，対数を取ることにより体積含水率により近い分布に変えたからであると考えられる。

4. おわりに

本研究により，S1 の対数を取り正規化し，体積含水率を正規化したデータにフィッティングした手法により尤もらしいパラメータの同定ができることが分かった。

表-1 フィッティングの精度

(NSE が 0.7 以上のものに色を付けた)

S1		ZLL	ZLS1	ZL θ	ZN
	RMSE	0.446	0.458	0.494	0.495
	NSE	0.803	0.792	0.759	0.757
S2		ZLL	ZLS2	ZL θ	ZN
	RMSE	0.489	0.501	0.548	0.555
	NSE	0.764	0.751	0.697	0.689
S3		ZLL	ZLS3	ZL θ	ZN
	RMSE	0.703	0.542	0.528	0.538
	NSE	0.511	0.704	0.720	0.708
SWI		ZLL	ZLSWI	ZL θ	ZN
	RMSE	0.399	0.407	0.412	0.415
	NSE	0.839	0.833	0.829	0.826

θ \ S	log取る	log取らない
log取る	ZLL	ZL θ
log取らない	ZLS	ZN

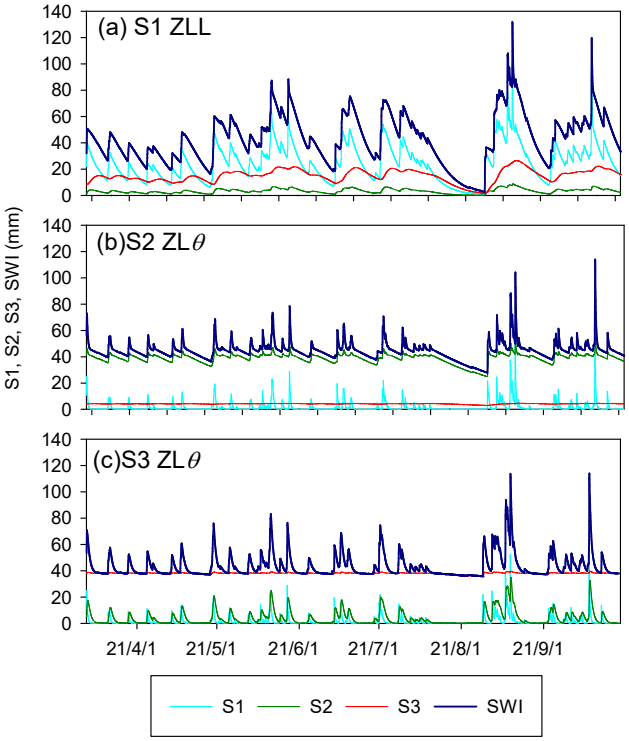

図-2 同定したパラメータを用いて算出した土壌雨量指数の時系列

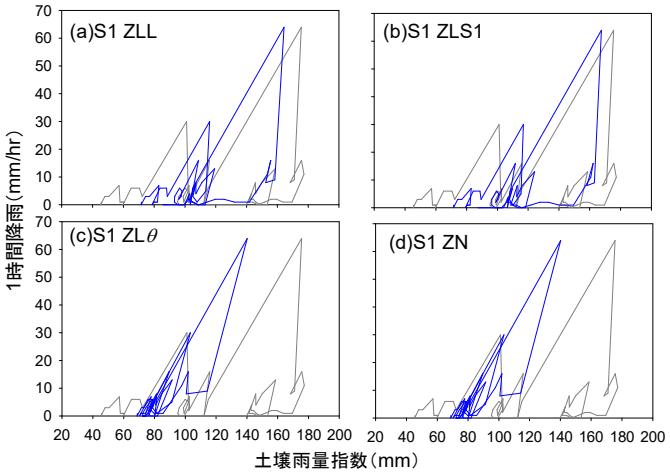

図-3 同定したパラメータを用いて描いたスネーク曲線

（青線；タイトルのケース，灰色線；Ishihara&Kobatake[1] のケース）

参考文献

1) Ishihara, Y.・S. Kobatake, Runoff Model for Flood Forecasting, Bulletin of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol.27, pp. 27-43, 1979

2) 林祐妃・藤本将光・宮崎祐輔・小山倫史・中井卓巳・藤原康正・岸田潔：現地モニタリングに基づく土壌雨量指数の妥当性の検討，Kansai Geo-Symposium 論文集，Vol.9，pp.110-114，2021

3) Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: River flow forecasting through conceptual models Part I-A discussion of principles, Journal of Hydrology, Vol.10, No.3, pp.282-290,1970