

TDR を用いた実斜面における土中水分の計測について

Measuring Soil Water Content of Real Slopes by the Time Domain Reflectometry

市川嘉輝*・馬場仁志**・平野道夫***・清水康行****

By Yoshiteru ICHIKAWA, Hitoshi BABA, Michio HIRANO and Yasuyuki SHIMIZU

Understanding the behavior and content of soil water is important for analysis of its infiltration. Tensiometers are conventionally used to measure the suction pressure. The suction pressure is then converted into the volume of water content by using conversion equation. The problem with this method is that the water content, computed by conversion equation, is remarkably different depending on the equation used. Our research intended to give the relationship between the volume of water content and the suction pressure. Both of them were measured at the same time on real slopes by time domain reflectometry (TDR), which is capable of directly measuring the volume of water content. The volume of water content computed by TDR was compared with the water content converted from the suction pressure by the traditional method to study the accuracy and characteristics of TDR. Here, we also discuss the results of the comparison.

Keywords : suction pressure, soil water content, time domain reflectometry

1. はじめに

降雨から浸透・流出までの物理機構の研究においては、各プロセスにおける現象の実態を出来るだけ正確に計測することが重要である。中でも、斜面における水分の時間的・空間的な移動特性は、流出機構の本質となる部分でもあり、その実態を明らかにする必要性は大きい。しかしながら、実際の斜面における水分量の観測を、降雨開始による吸水過程から降雨終了後の排水過程に至るまでの長時間、それも土中の広い範囲で連続的に行うことは非常に難しい。

従来より、現場での土中水分量の直接計測は困難であったため、テンシオメータなどでサクション圧を測定し、サクション圧と体積含水率の関係から土中水分量を推定する方法が一般的に行われている^{1,2)}。しかしながら、サクション圧と体積含水率の関係は別途室内試験により求めなければならず、現場の土層の状態をどの程度まで室内試験で再現可能かという問題がある。さらに、現場でのテンシオメータの使用においては、土壌との馴染み具合や他の外的要因からくる不安定性、こまめなメンテナンスの必要性など様々な問題が付きまとう。著者ら³⁾も試験流域内の実斜面に深度別、標高別にテンシオメータの設置を行い、サクション圧の連続計測を数年来行っているが、現在のところ年間を通じて安定したデータを得るには至っていない。

*正会員 開発土木研究所環境水工部河川研究室 (062 札幌市豊平区平岸1-3)
**正会員 開発土木研究所環境水工部河川研究室 (062 札幌市豊平区平岸1-3)
***正会員 北海道開発局室蘭開発建設部 (051 室蘭市入江町1-14)
****正会員 工博 北海道大学工学部土木工学科防災講座 (060 札幌市北区北13条西8丁目)

さらに、前記のサクシオン圧～体積含水率の関係は、不飽和浸透流解析⁴⁾を行う場合に用いられる重要な関係式であるにも係わらず、現場の条件下でのサクシオン圧と体積含水率の関係が必ずしも正確に把握出来ないため、解析結果の解釈やその精度を議論する場合に、あいまいさが残る原因ともなっている。

近年開発された *Time Domain Reflectometry* 方式の計測器(以下 TDR と呼ぶ)は、棒状のプローブを土層中に差し込むことにより、直接土中水分を計測することが可能とされる計測器である。本研究では、この TDR を試験流域の実斜面にテンシオメータとほぼ同位置に連続的に配置し、体積含水率の連続計測を行った。この結果得られたデータをもとにサクシオン圧および体積含水率の時間的・空間的な変化状況を図示し、同時に計測された降雨や流出量とも比較しながら、両者の相関関係を検討する。また、これらのデータと現地で採取した土を用いた室内試験によるサクシオン圧と体積含水率の関係を比較し、実斜面における TDR による計測の有効性を検討する。

2. 計測機器および計測斜面について

本研究で用いた TDR(カナダ GS.gabel 社製)は槍状のプローブ部と、制御およびデータロガー部に分かれる(写真-1)。プローブの設置は地面にあらかじめ地面に同形状の鋼棒を打ち込み、引き抜いた後に挿入することにより行われるため、ほとんど土壌を乱すことなく計測が可能となる。体積含水率は、プローブを中心とする任意半径(約3cm～5cm)の円柱状の範囲内において、物質(ここでは、土・水・空気)の異なる誘電率の作用を利用し、本体からプローブに発せられたパルスの反射波の遅れ時間を利用し水分量を算定したもので、データは単位プローブ長平均で出力される。本研究で使用したプローブは上から15cm、15cm、15cm、15cm、30cmの計90cmのタイプのものである。

計測斜面は、図-1に示す、定山溪小樽内川流域内の河川近傍に位置する斜面中腹で、エゾマツやドドマツ等の植生が存在する。勾配は33°から39°のほぼ一様勾配であるが、この斜面の下端から下と、上端から上は極端に緩やかな斜面となっている。表層は落ち葉などの腐葉土で約20cmから50cm厚で被われ、その下層約4mから6mほどは岩塊混じりの凝灰質砂礫層になっている。この斜面にテンシオメータを斜面方向10m間隔(斜面下からst1,st2,st3,st4,st5とする)に5箇所4深度(20cm,40cm,70cm,100cm)に、TDRをst1,st3,st5のテンシオメータと同位置に設置した。

3. 計測結果

計測データは平成8年7月1日から9月30日までのものを用いた。TDRによる計測深度別の体積含水率の変化図を図-2に、また、テンシオメータによる深度別のサクシオン圧の変化図を図-3に示す。これらの図は、土壌水分変化を表す代表値として

st1のデータを用い、図中の数字はそれぞれ計測深度を表している。また、図には土壌水分観測地点近傍に位置する北海道開発局既存の小樽内川観測所で観測された降雨強度も同時に表示してある。図-2の体積含水率変化は7月に欠測期間はあるが、その後は良好に計測が行われている。図-2によれば、土中の水分は降雨によって急激に増加し、降雨停止後から浸透流出によって緩やかに減少し、これを繰り返して徐々に土壌全体の貯留量を増加させていることがわかる。

図-3のサクシオン圧変化図によれば、7月の計測始めで不安定なところはあるが、その後良好に計測が行われている。降雨の発生後、急激にサクシオン圧の変化が負の方向から正の方向に移行し、降雨が停止

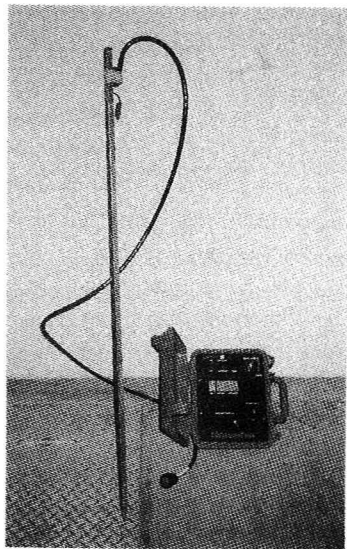


写真-1 計測器写真(TDR)

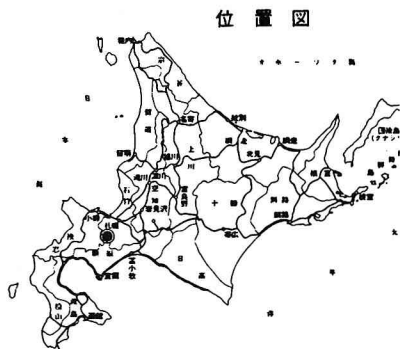


図-1 試験流域位置図

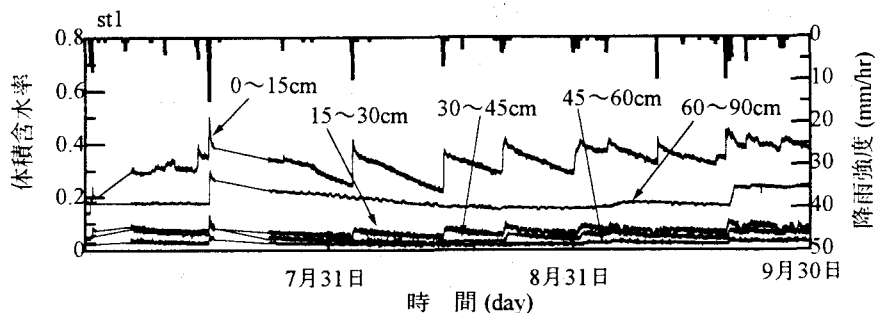


図-2 体積含水率と降雨強度の変化図

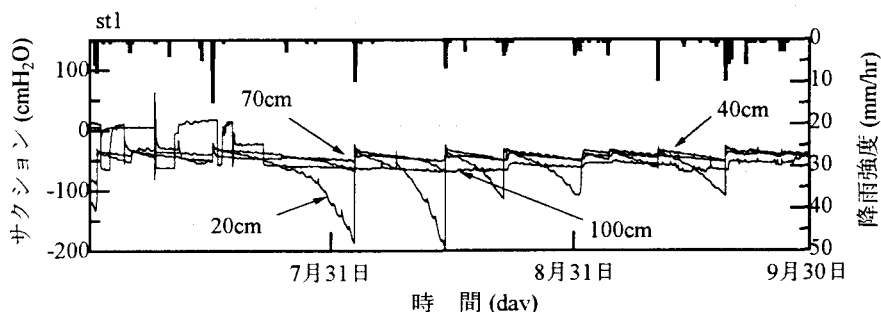


図-3 サクシヨン圧と降雨強度の変化図

すると、土壌中の水分が減少することで、値は再び負の方向に徐々に変化している。サクシヨン圧値も、土壌が繰り返し降雨を受け、貯留量が増加するにつれて徐々に正負の振動幅が少なくなっている。

図-2 および図-3 によれば、体積含水率およびサクシヨン圧値共に、降雨発生直後に値が急上昇し、降雨終了後に緩やかに減少する傾向が見られる。ただ、体積含水率は増加・減少ともに直線的な変化をしているのに対し、サクシヨン圧値は直線的に増加し曲線的に減少する傾向が見られる。

降雨時の土中の水分移動の様子を見るために多少ラフではあるが、体積含水率の計測値を用いて土中水分量をコンター図で表したのが図-4である。ここで、図-4の上部に示す降雨強度および流量図は、9月20日の7時から21日の12時までに発生した総雨量45mmのデータと、降雨強度と同じ観測所で観測された流量データであり、この図中の(a)~(e)の時刻での土壌水分量コンター図が上から順に表示してある。これらコンター図の右側が計測斜面の上端、左側が下端を示す。

降雨発生後、斜面表層から中層にかけて体積含水率の値が上昇しており、特に表層における斜面下端の値が他よりも高い値を示している。降雨停止後、斜面表層の体積含水率は減少し、逆に下層の値が徐々に増加している。これらの現象と河川流量の変化を比較すると、発生した降雨は、斜面の表層および表面を流下する速い流出として河川に出水し、これが河川増水の要因となる。降雨が停止すると、表層から下層へ浸透した水分が、貯留成分とは別に遅い流出として河川に出水し、基底流量を維持するものと考えられる。

4. 実斜面における体積含水率とサクシヨンの相関

一般に体積含水率とサクシヨン圧には相関関係があり、体積含水率の直接計測が困難な場合には、サクシヨン圧からこの相関関係式を利用して体積含水率を推定する方法が用いられてきた。本研究では、TDRにより実斜面の体積含水率の直接計測が可能となったため、実斜面のデータを用いてこの相関関係を調べることにした。また、この関係と試験斜面から採取した土壌で、室内試験によって得られた体積含水率とサクシヨン圧の関係との比較も行う。

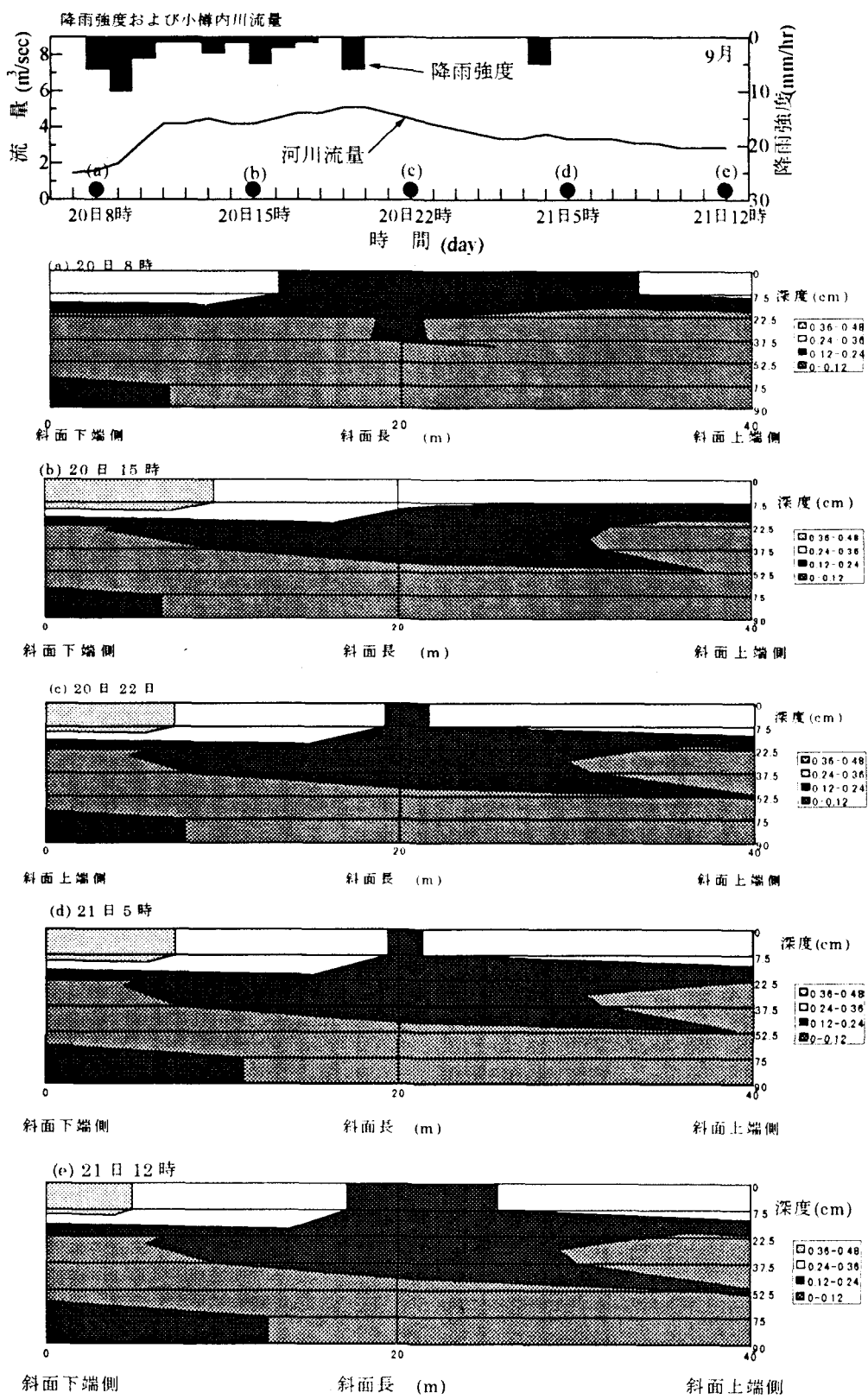


図-4 土壌水分量変化図

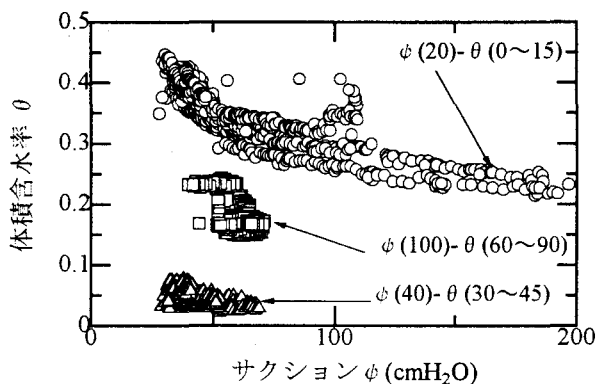


図-5 体積含水率とサクション圧の関係図

表-1 計測深度別データ表

	サクション圧の 測定深度	体積含水率の 測定深度
○	20cm	0~15cmの平均
△	40cm	30~45cmの平均
□	100cm	60~90cmの平均

図-5に、この実斜面データに基づく体積含水率とサクション圧の関係を示す。ここで、体積含水率のデータはセンサーの部分長当たりの平均値であるのに対して、サクション圧は測定点の値であるため、表-1に示すようなデータの互いに最も近い測定点どうしの相関を表してある。図-5によれば、体積含水率とサクション圧の関係は、その測定位置によって大きく異なっている。丸は表層に位置する腐葉土層の値を示し、砂礫層に位置する他の値と比較して体積含水率に対するサクション圧の分布域が広く、体積含水率も常に高い値にある。これは腐葉土と砂礫とによる水分保持能力の違いによるものと考えられる。また、三角と四角は同じ砂質土と考えられる所の値を示しているが、これら二地点は腐葉土層とは異なり分布域は狭く集中し、傾向は類似しているが、相関関係は異なっている。腐葉土層と砂礫層では土壌の状態が異なっているため、体積含水率とサクションの関係における分布状態が異なることは容易に推定できるが、ほぼ同じ土質と考えられる計測位置にあっても両者の相関関係が異なることがあることから、厳密に流域内の土質特性を把握することは非常に難しい問題である。

5. 実斜面における透水係数

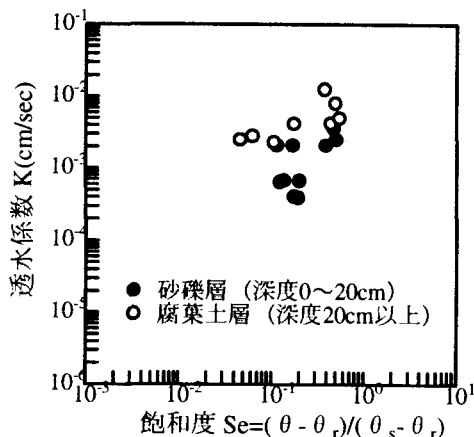


図-7 不飽和透水係数と飽和度の関係図

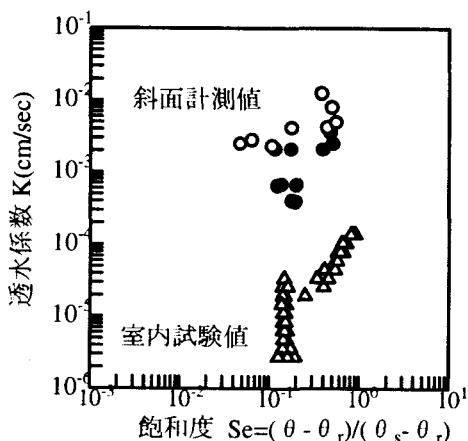


図-8 TDR 測定値と室内試験値との比較図

斜面における浸透流出問題を扱う場合に重要なパラメータの一つに不飽和透水係数が挙げられる。通常、不飽和透水係数は土壌のサンプルを用いた室内試験により求められるが、ここでは実斜面でTDRにより計測された土壌水分の移動特性をもとに不飽和透水係数の特性を検討する。具体的には、降雨発生後土中の含水率が急上昇する瞬間をTDRのデータから時間的、空間的に求め、水分の移動速度を把握する。即ち、降雨による水分の浸透する速度をTDRに沿って上層から下層の単位ブローブに伝わる時間お

よび単位ブローブ長から算出し、これにより透水係数を求める。この方法で土中各地点の不飽和透水係数を求め、これと、有効飽和度との関係を示したのが図-7である。ここで、白丸は深度0~20cmの腐葉土層の値であり、黒丸は深度20cm以上の砂礫層の値である。また、体積含水率の値は、単位ブローブの値の立ち上がり時およびその下層の単位ブローブの値が立ち上がる直前の値との平均値である。飽和体積含水率は腐葉土層では0.45、砂礫層では0.15を用い、水分の移動がないと考えられる限界の体積含水率は腐葉土層では0.25、砂礫層では0.03を用いた。図-7によれば、有効飽和度と体積含水率との関係は、腐葉土層および砂礫層それぞれ室内試験結果で得られるような正の相関関係が見られる。しかしながら、個々には異なった分布型をしており、腐葉土層は砂礫層よりも傾きが緩やかで、体積含水率の変化に対して透水性の変化は少ないことが分かる。このことから、TDRのデータを用いることによっても不飽和透水係数の深度もしくは土壌形態別の特性がある程度把握可能と考えられる。

図-7に示す現地によるTDR計測データと、室内試験による不飽和透水係数と有効飽和度の関係をそれぞれ図-8に示す。ここで、黒丸は腐葉土、白丸は砂礫土でのTDRによる現地計測データを示し、四角は室内試験データを示す。図-8によると、これらは異なった分布型をしており、現地計測データは室内試験データと比較し透水の大きい値で分布している。現地土壌中には、植生の根や小動物が活動した空隙が存在するが、室内試験において試料を形成するとき、空隙まで再生することは難しく、実際にはこの試験値よりも大きいことが予想されることから、室内試験値を用いる場合この点に留意する必要があると考えられる。

7. おわりに

定山溪ダム上流の試験流出地内の斜面にTDRを連続的に設置し、降雨発生後の斜面内の土中水分の分布特性および移動特性を検討した。この結果、TDRのデータより土中水分量が時間的・空間的にどう変化するかを十分に把握することが可能であることが確かめられた。また、同時に設置されたテンシオメータによるサクシオン圧のデータを用いて、体積含水率とサクシオン圧の関係を調べた。この結果、土壌組成の違いや、計測位置の違いで、体積含水率とサクシオンの相関関係が異なる結果が得られた。さらに、TDRデータによる土壌水分の移動特性から、実斜面における透水係数の推定を行い、これを現地砂による室内試験結果と比較した。この結果、室内試験による透水係数はTDRにより推定された現地の透水係数に比べてかなり小さい値となっていることがわかった。これは、現地の土壌の状態と室内試験における土壌の状態が異なるためと考えられ、今後浸透流の計算を行うに際しては十分な注意が必要であろう。

TDRはテンシオメータによる計測とは異なり、体積含水率を直接測定することが可能であり、実流域の土中水分の計測においては非常に有効であることが示された。

参考文献

- 1) 太田猛彦, 日野幹雄, 塚本良則: 山腹斜面における二次元不飽和流の解析, 水理講演会論文集 Vol.27, pp393-399, 1983.
- 2) 松林宇一郎, 高木不折, G. T. ベラスケス, 貴家尚哉, 鷺見哲也: 山腹斜面における浸透特性と雨水流経路への植生の影響, 水工学論文集 Vol.38, pp185-190, 1994.
- 3) 市川嘉輝, 渡辺康玄: 実流域斜面における土中水分の変化について, 土木学会北海道支部論文報告集 Vol.52, pp124-129, 1996.
- 4) 日野幹雄, 太田猛彦, 砂田憲吾, 渡辺邦夫: 洪水の数値予報, 森北出版株式会社.