

土のキャピラリー・バリア機能を利用した雨水資源の保全・活用技術の開発

森井俊廣^{1*}・門口隆太²・小松元太³・松本 智⁴

(平成23年1月20日受付)

要 約

砂層とその下部に礫層を重ねた単純な構造の土層地盤では、互いの層の土粒子の大きさあるいは間隙サイズに伴う保水性の違いにより、砂層と礫層の境界面の上部で降下浸潤水が保水され、集積する。境界面に傾斜をつけると、集積水は傾斜方向に流下していくため、境界面はあたかも不透水性の障壁として機能し、それ以深の領域への水の浸入が抑制される。また、境界面に沿って流下した水は、末端で集水することにより、貴重な雨水資源として捕獲することも可能である。砂層と礫層を重ねた単純な土層地盤にみられる浸潤水の遮断・捕獲の機能を、土の毛管障壁あるいは土のキャピラリー・バリア (Capillary barrier of soil) と呼ぶ。傾斜したキャピラリー・バリアのもつ浸透抑制機能を利用すれば、地盤に浸透した降雨水を表層部で効果的に捕捉し、地盤深部への浸潤を低減できるため、地山斜面やため池堤防斜面などの斜面すべり防止技術への展開が可能となる。一方、キャピラリー・バリアを地表面の近傍で平面状に敷設すれば、土壤水を根群域に保水できるため、節水かんがいが可能となる。

このような土のキャピラリー・バリアがもつ応用展開の可能性に着目し、まず、土のキャピラリー・バリアの技術的特徴を紹介したのち、野外実験および圃場実験にもとづき、傾斜したキャピラリー・バリア地盤における雨水遮断機能ならびに水平状に敷設したキャピラリー・バリア地盤における節水かんがいの可能性を調べる。

新大農研報, 63(2):99-107, 2011

キーワード：土のキャピラリー・バリア、雨水資源、不飽和土の水理特性

はじめに

砂層とその下部に礫層を重ねた単純な構造の土層地盤では、互いの層の土粒子の大きさあるいは間隙サイズに伴う保水性の違いにより、砂層と礫層の境界面の上部で降下浸潤水が保水され、集積する。境界面に傾斜をつけると、集積水は傾斜方向に流下していくため、境界面はあたかも不透水性の障壁として機能し、それ以深の領域への水の浸入が抑制される。また、境界面に沿って流下した水は、末端で集水することにより、貴重な雨水資源として捕獲することも可能である。砂層と礫層を重ねた単純な土層地盤にみられる浸潤水の遮断・捕獲の機能を、土の毛管障壁あるいは土のキャピラリー・バリア (Capillary barrier of soil) と呼ぶ。傾斜したキャピラリー・バリアのもつ浸透抑制機能を利用すれば、地盤に浸透した降雨水を表層部で効果的に捕捉し、地盤深部への浸潤を低減できるため、地山斜面やため池堤防斜面などの斜面すべり防止技術への展開が可能となる。一方、キャピラリー・バリアを地表面の近傍で平面状に敷設すれば、土壤水を根群域に保水できるため、節水かんがいが可能となる。

このような土のキャピラリー・バリアがもつ応用展開の可能性に着目し、本文では、まず、土のキャピラリー・バリアの技術的特徴を紹介したのち、続く章で、傾斜キャピラリー・バリアを対象とした野外および室内実験により、斜面における雨水の浸潤遮断機能と斜面減災工への展開の可能性を探る。次いで、平面状キャピラリー・バリアを造成した圃場における植栽実験を通して、節水かんがい技術としての展開の可能性を調べる。

最後の章では、土のキャピラリー・バリアが持つ機能を総括的にまとめ、展開の方向性を述べる。

キャピラリー・バリアの実務分野への適用例は多くない。唯一、国内外で具体的な適用技術となっているのは、廃棄物処分場における表面被覆工 (トップカバー) である。2004 年に「汚染水の浸出を防止」と題して、広く、利用例が雑誌報告 (日経コンストラクション, 2004) されているが、土のキャピラリー・バリア機能を、直接、防災技術に適用しようとする研究事例は、残念ながら少ない。そのような中、2007 年 4 月に南京市で開催された第 3 回不飽和土アジア会議において、Nanyang 工科大学の Dr. H. Rahardjo らのグループから、風化残積土斜面を対象に、キャピラリー・バリアを利用したすべり防止工の研究に着手したとの報告講演があった (Rahardjo, *et al.*, 2007)。まだ少ない事例ではあるが、このような研究動向から、土のキャピラリー・バリア機能を実務問題に展開していこうとする方向性は、技術分野において十分に支持されるものであると考える。一方、最近の調査によると、中国河北省において、キャピラリー・バリアを利用して、アルカリ土壌の改良に向けた研究 (郭ら, 2006) が進められているようである。水を通しやすい砂と礫を利用して逆に水を遮断する発想は、敬服すべき巧みである。これまでの経験に裏打ちされたごく日常的な技術を、科学技術の目を通して、再評価し普遍化できれば、斯界の技術の発展に大きく寄与できる可能性がある (松本と森井, 2009)。いずれにしても、キャピラリー・バリアに用いられるのは砂と礫の天然材料であり、それ自身、自然環境への負荷が小さいという点で、優れて現代的な説得性をもつ技術といえる。また、キャピラ

¹ 新潟大学自然科学系 (農学部)

² 農林水産省農村振興局

³ 長野県長野地方事務所

⁴ 新潟大学大学院自然科学研究科・新潟県土木部

* 代表著者: morii@agr.niigata-u.ac.jp

リー・バリアを利用した節水農業の適用を半乾燥地などの荒蕪地域に想定した場合、いずれの材料も現地で容易に入手できることが多く、土層の敷設工事に特殊な技術を必要とせず頻繁な維持管理も不要であるため、現地の農家や農業団体、あるいは環境団体が経済的な技術として採用しやすいという重要なメリットをもつ。

土のキャピラリー・バリアの技術的特徴

1. 土のキャピラリー・バリアの技術的特徴

大小の粒子で構成される土は、水を通すとともに、浸潤してきた水を間隙内に適度に保持できるすぐれた性質をもつ。砂層とその下部に礫層を重ねた層状地盤では、両層の土の相対的な保水性の違いにより、境界面の上部の砂層内で降下浸潤水が捕捉され、集積する(図1(a))。砂層と礫層との境界面が、上部からの水の浸入を防いでいる障壁のようにみえることから、この機能あるいは現象を土のキャピラリー・バリアという。境界面の上部に捕捉された間隙水は、一定の質量をこえて集積すると、重力の作用によって下層に浸入し始める(Breakthrough、ブレイクスルー)。ここで、境界面に傾斜があると、集積された間隙水は、上部の砂層内を、集積流(Funneled flow)(宮崎、2000)として傾斜方向に流下し、境界面以深の領域は一定の範囲にわたって水の浸入から保護されることになる。(図1(b))。

キャピラリー・バリアは、上部に相対的に細粒の土、下層に粗粒土があれば機能するが、境界面の上部に集積した間隙水を

効果的にすみやかに傾斜方向に流下させるには、上で述べた砂層と礫層の組合せが实际的である。土のキャピラリー・バリアは、古くは古墳の造営技術に用いられ、石室の湿潤化を防ぐのに一役かってきた(渡辺、1992)。最近では、先に述べたように、廃棄物処分場のトップカバーとして利用されている。廃棄物フィルの変形に対する追従性が良いこと、透気性をもつため廃棄物の自然還元効果的であり、さらには維持管理が容易であるなどの利点があげられている(日経コンストラクション、2004)。いずれの適用例においても、長い供用期間にわたって、キャピラリー・バリアが持続的に機能することを前提としている。図2は、傾斜角約20°、水平長約2mの小規模斜面で、約4カ月にわたってモニターされたキャピラリー・バリア地盤内の水分動態である(森井ら、2009)。厚さ約20cmの砂層とその下部に10cmの礫層が敷設されたのち、境界面の上部の砂層内の1、5、10および15cmの位置、ならびに境界面直下の礫層内の-2cmの位置で体積含水率が測定されている。砂層内の水分量は、地表面から境界面までの全深さにわたって、降雨に対応して敏感に増減している。これに対し、-2cmと記された礫層内の水分量はほとんど変化しておらず、降雨に伴う深層部への降下浸潤がほぼ完全に遮断されているのを確認できる。

2. キャピラリー・バリア地盤の構造設計

キャピラリー・バリア地盤では、上述したように、相対的により大きな保水性をもつ上部の砂層に水分が保留され、水分量が多くなると不飽和透水係数も相対的に大きくなるため、傾斜した境界面に沿って集積流が形成され流下していくことになる。しかし、自然環境下では、地表面から斜面全長にわたって降雨浸潤等により水分が供給されるため、集積流は流下するにつれ、次第にその質量を増していく。水分量が増加し砂層がそれ以上の量の水分を保持できなくなると、下部の礫層へ水分が降下浸潤を始め、水平状の地盤と同じように、ブレイクスルーが起きる。集積流の始まりからブレイクスルーが生じる地点までの水平距離を限界長(Diversion length)と呼ぶ(小島と宮崎、2004)。土のキャピラリー・バリアを降下浸潤の遮断あるいは制御の目的で利用しようとする際、この限界長は、キャピラリー・バリア地盤の規模や構造を決定する重要な設計パラメータとなる。

限界長の大きさには、構造因子として境界面の傾斜角、材料因子として砂と礫の不飽和水分特性、ならびに外的因子として浸潤強度(これには構造因子として砂層の厚さが関係する)が関与し、すでに、これらの因子を取り込んだ限界長の予測式が

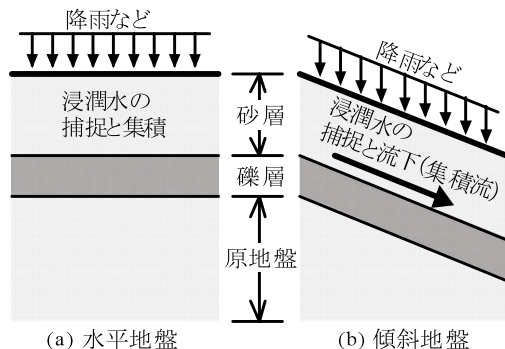


図1 キャピラリー・バリアによる浸潤水の捕捉(概念図)

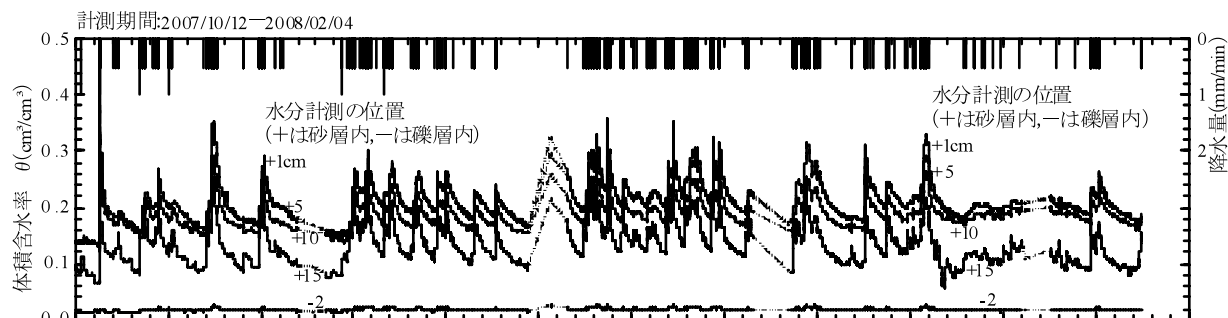


図2 キャピラリー・バリア地盤内の水分動態

いくつか提案されている。式(1)は、その中で比較的精度が良いとされている Steenhuis ら (Steenhuis, *et al.*, 1991) による限界長 L の予測式である (Walter, *et al.*, 2000; Smesrud and Selker, 2001; 小島と宮崎, 2004)。地盤に浸潤するフラックス q が砂層の飽和透水係数 K_s に比べて十分に小さい場合、次のようになる。つまり、

$$L \leq \frac{K_s}{q} \tan \phi [\alpha^{-1} + (h_a - h_w)] \quad (1)$$

ここで、 ϕ は砂層と礫層との間の境界面の傾斜角、 h_a は砂の空気侵入値、 h_w は礫の水分侵入値である。式(1)の a は、砂の不飽和透水係数 K を負の圧力水頭 h の指数関数で近似した場合の係数である。つまり、

$$\begin{aligned} K &= K_s \quad h < h_a; \\ K &= K_s \exp[-\alpha(h - h_a)] \quad h \geq h_a \end{aligned} \quad (2)$$

図3は、式(1)に基づく限界長の推定値を、室内土槽試験 (Walter, *et al.*, 2000) および野外 (森井ら, 2009) での測定値と比較したものである。おおむね、式(1)の良好性が確認できる。限界長は、雨量の多少によるが、理論的には5mから50mほど可能であるとされており (Ross, 1990)、キャピラリー・バリア地盤の構造設計に関わる実務的な課題として、さらに大きな限界長での検証が必要となっている。

3. 環境にやさしい地盤構造物

キャピラリー・バリアは、用いられるのが砂と礫の自然材料であり、それ自身、自然環境への負荷が小さいという点で、優れて現代的な説得性をもつ。深層部への降雨浸潤の遮断機能に着目すると、斜面すべりを抑制する減災工として利用できる可能性をもつ。この場合、砂と礫がもつ材料としてのすべり安定性能と限界長との兼合いが構造設計の新たな検討課題となる。また、野外条件下における構造物としての耐久性を確認していくことも、必要である。特に、キャピラリー・バリアは、上部層が砂であるため、降雨によって浸食を受けやすい。地表面の

植生により降雨の地盤浸潤が抑制できることから、キャピラリー・バリアとの相乗効果を期待して、植生被覆工を積極的に導入していくことが有力な選択肢となる。

図1(a)の水平状に敷設したキャピラリー・バリア地盤は、いわば広大な「植木鉢」である。根群域の深さに応じて礫層を水平状に敷設すれば、地表面から降下浸潤する雨水やかんがい水はこの根群域内に集積し、植物生育に有効に利用される。キャピラリー・バリアは、半乾燥地域における小規模な雨水ハーベスティングあるいは節水農法として、制約された水資源を有効に利用できる技術になりうる。礫層による水分移動の遮断機能は、深部の地下水からの毛管水の上昇に対しても働くことから、半乾燥地域で問題となっている塩類集積を効果的に制御できる可能性を合わせもつ。このようなキャピラリー・バリアの適用を通して、地盤工学あるいは不飽和土工学の環境事業分野における新たな展開を図ることができるのではないかと考えられる。

斜面における雨水の浸潤遮断と斜面減災

1. 土の毛管障壁機能による雨水の浸透遮断

前章で説明したように、キャピラリー・バリアは、砂層とその下部に礫層を重ねて傾斜させた、単純な構造の土層地盤をいう。砂層と礫層の境界面の上部では、互いの土粒子の大きさに伴う保水性の違いにより、降下浸潤水が集積し、傾斜方向に流下していく。両層の境界はあたかも不透水面のバリアとして機能し、それ以深の領域は水の浸入あるいは湿潤化から保護されることになる。土のキャピラリー・バリア機能を利用することにより、地盤に浸透した降雨水を表層部で効果的に捕捉し、斜面末端に流下させることができる。これにより、地盤深部への雨水浸潤が低減し、土の強度の低下あるいは自重の増大を抑制することができる。このようなキャピラリー・バリアがもつ雨水浸透抑制効果を利用すれば、自然地山斜面やため池堤防斜面を対象とした斜面すべり減災技術の開発が可能となる。境界面にそって流下する流れ(集積流)は、次第にその質量を増し、ある位置で下層へ降下浸潤し始める。集積流の開始位置からこの破過が起きるまでの水平距離を限界長といい、キャピラリー・バリアの断面構造を決める重要な設計因子となる。本章では、圃場斜面に砂礫層地盤を造成し、長期にわたり、キャピラリー・

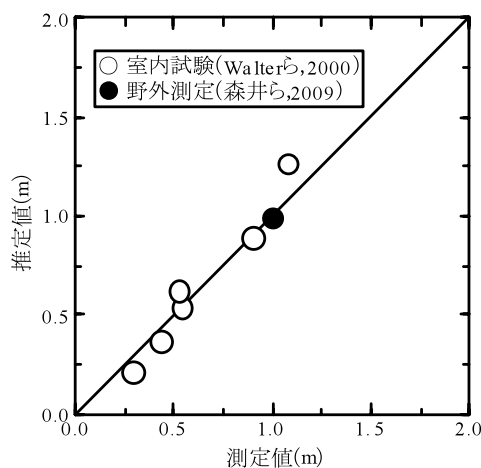


図3 限界長の予測値と計測値

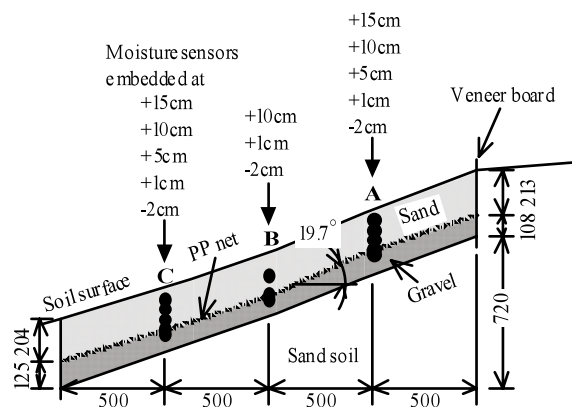


図4 砂地斜面に造成したキャピラリー・バリア地盤

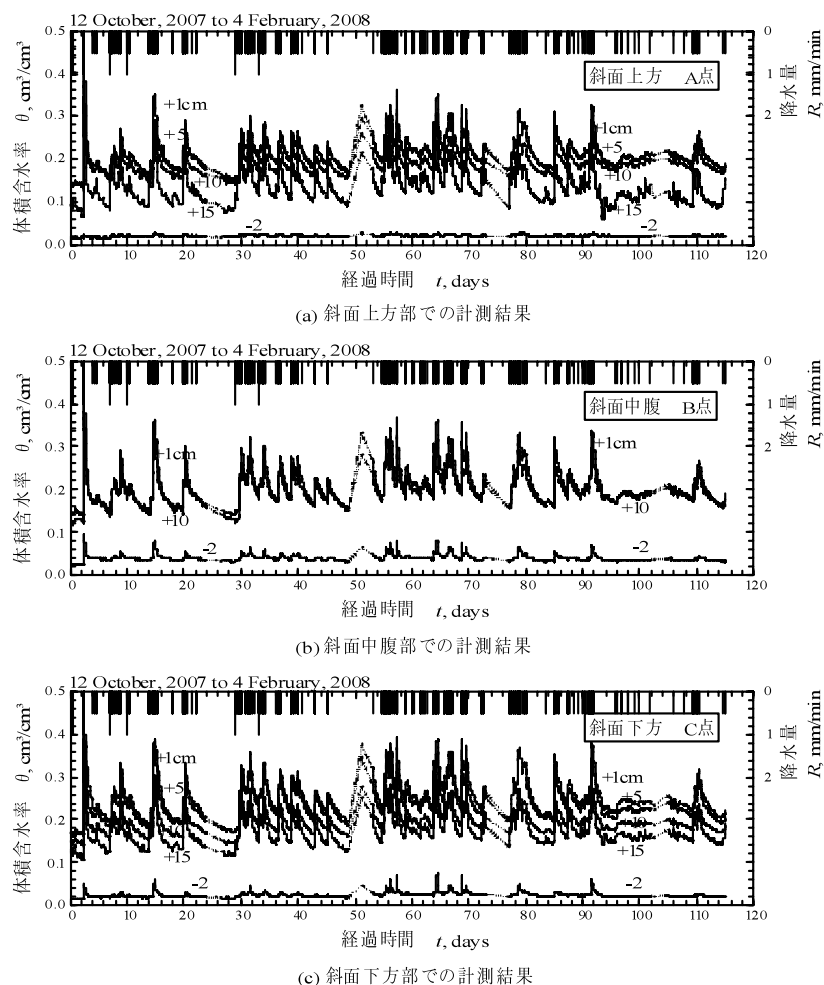


図5 キャピラリー・バリア斜面における土中水分量の長期計測結果

バリアのもつ雨水浸潤に対する遮断機能を観察するとともに、計測結果に基づき限界長を推定し、公表理論との比較考察を行う。

図4に示すように、砂地圃場の斜面で、砂層とその下に礫層を敷設したキャピラリー・バリア地盤を造成し、約4ヶ月にわたって、地盤層内の水分動態をモニターした(上原ら, 2009)。上部の砂層には粒径0.1~2mmの砂、その下の礫層には4~7mmの礫(珪砂)を用い、それぞれ、厚さ約10cm、約20cmに締固めた。水平長さ約200cm、幅は約50cmで、周囲をベニヤ板で囲った。図中の黒丸点は、土中水分量(体積含水率 θ)の計測位置である。砂層内には、境界面から上に鉛直距離1、5、10および15cmの位置に2個ないし4個を、礫層内には境界面直下の-2cmの位置に1個を埋設した。 θ の計測には土壌水分センサーECH₂O誘電率計モデルEC-5(Decagon Devices社製)を用いた。

図5に、2007年10月から2008年2月にかけて計測した θ の変化をまとめる。上段、中段および下段の図は、それぞれ、斜面の上方部(図4のA点)、中腹部(同じくB点)および下方部(同じくC点)での計測結果である。降雨にともない、砂層部では、表層に近い位置から順に θ が上昇し浸潤が起きている。これに対し、礫層では水分変化(図中で-2cmと注

記された計測結果)はほとんど生じておらず、キャピラリー・バリアにより降雨浸潤に対する遮断機能が適切に機能していることが確認できる。

図5で、上段と中段および下段の図とを比較すると、礫層の水分量の変化にわずかに違いがあることが分かる。上段の図、つまり斜面上方部のA点では、ほぼ完全に遮断機能が発揮され、礫層内の水分量はまったくといってよいほど変化していない。これに対し、中段図の斜面中腹部B点および下段図のC点での計測結果では、降雨の直後に、水分量が一時的に増加しており、かつ、礫層の水分量の平均値はA点に比べ高くなっている。降雨時の礫層の θ の急増は、斜面下方部のC位置でも見られた。礫層の水分量の上昇は、上部の砂層からの破過を意味していることから、図5には、限界長に関する情報が計測されていることになる(松本と森井, 2009)。キャピラリー・バリアの限界長の推定式は、これまでにいくつか提案されており、先に述べたように、このうち式(1)で示したSteenhuisらの提案式が実務的であるとされている。

図6は、キャピラリー・バリア地盤の造成に用いた砂と礫の水分特性曲線である。これによると h_a と h_w はそれぞれ16cmと1cm程度である。砂の水分特性曲線から、van Genuchten式(Stephens, 1996)を用いて K を推定し、式(2)にしたがっ

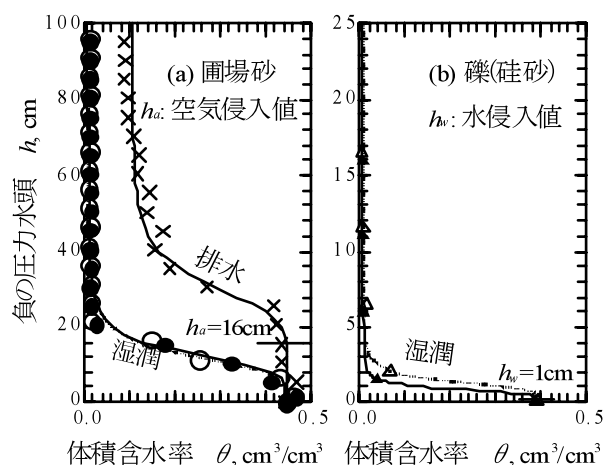


図6 砂と礫の水分特性曲線(土柱法試験による)

て飽和に近い領域で a を求めると、 $0.077/\text{cm}$ が得られる。造成した地盤から採取した乱さない砂の透水試験より、 K_s は $8.2 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であった。計測期間にわたる平均的な降雨量として $q=0.5 \text{ mm/min}$ とみなし、これらの値を式(1)に代入すると、 L は 99 cm 程度と計算される。図4に示した断面図から、斜面上部部の計測位置 A は、集積流が始まる斜面上端部より水平距離 50 cm にあり、 L に比べ短いため、破過はまだ生じない。しかし斜面中腹部の B 位置になると、斜面上端部からの水平距離は L とほぼ同じ 100 cm となることから、ブレイクスルーが生じる可能性は大きい。図2の中段図と下段図に見られる礫層内の水分量の急増は、このような砂層から礫層への降下浸潤を表すものと考えられ、式(1)の実務性が確認できたことになる。

2. 土の毛管障壁機能を利用した斜面減災工の開発

圃場で造成した砂層と礫層の層構造地盤における土中水分動態のモニターにより、降雨浸潤に対するキャピラリー・バリアの抑制効果を確認することができた。合わせて、野外の実用条件下で、限界長を計測した。限界長はキャピラリー・バリアの断面構造を決定する重要な設計因子である。その推定に Steenhuis らの提案式が有用であることを明らかにできたことは、キャピラリー・バリアを利用した斜面すべりの減災技術の開発を進めていく上で大きな進展となる。上部層の砂層は降雨により浸食を受けやすいため、植生被覆が必要となる。植生被覆により降雨の斜面浸透が効果的に抑制されることから、キャピラリー・バリアとの相乗効果を定量化していくことが重要な課題である。加えて、バリアを複層構造にすれば破過の影響を少なくすることが可能となる。

土のキャピラリー・バリア機能を利用した圃場規模の雨水ハーベスティング

1. キャピラリー・バリア地盤における植栽実験

砂層とその下部に礫層を重ねた土層地盤では、両層の土粒子の相対的な保水性の違いに由来する毛管障壁(キャピラリー・バリア)機能により、境界面の上部で降下浸潤水が捕捉され、集積する。境界面に傾斜をつけると(前掲の図1(b))、集積した水は傾斜方向に流下し、深層部への浸潤を遮断できるため、

廃棄物のトップカバーや斜面の減災工として利用が可能となる(松本と森井、2009)。一方、境界面を水平状にして根群域に応じた深さに敷設すれば(図1(a))、集積した水は植物生育に有

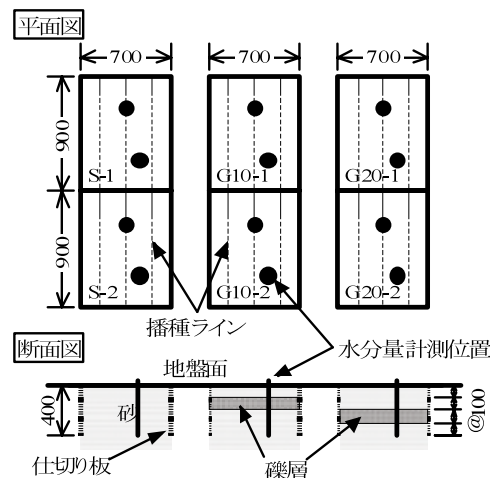


図7 植栽実験の区画

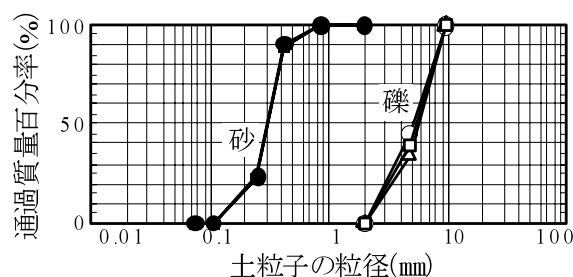


図8 砂と礫の粒度

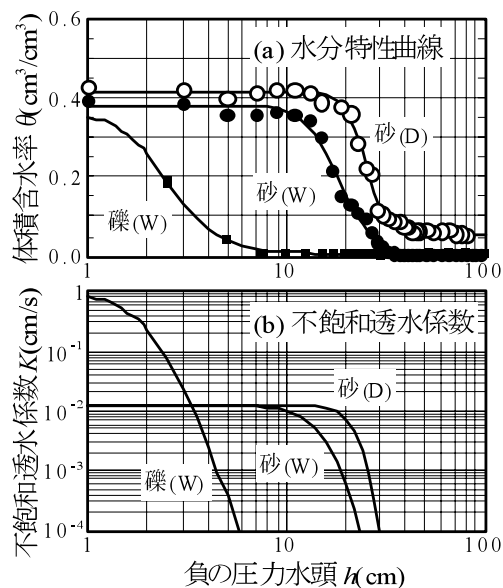


図9 砂と礫の不飽和水分特性

効に利用される (貴堂ら、2009)。半乾燥地開発等における小規模な雨水ハーベスティング技術として期待できる。本研究では、ガラス室内に造成したキャピラリー・バリア地盤で植栽実験を行い、地表面給水した浸潤水の地盤内における補足状況を観察するとともに、植物の生育量に及ぼす捕捉水の効果を調べた (小松ら、2010; 森井ら、2010; Morii, *et al.*, 2011)。

図7に示すように、ガラス室内の砂地圃場に幅70cm×長さ90cmの6区画を造成した。まず圃場を深さ40cmまで掘削したのち、区画に合わせてベニヤ板で作製した木枠を設置し、S区では全深さにわたって掘削した砂を手で締固めながら埋め戻した。図7の断面図に示すように、G10区およびG20区では、それぞれ、深さ10～20cm間および20～30cm間に礫 (珪砂1号) を敷設した。上部に砂を投入する際に砂粒子が礫の隙間に侵入しないよう、礫の上面に不織布を敷いた。図7で縦に隣接する区画は、繰返しを計画したもので、たとえばG10区では、これらをG10-1とG10-2のように区分している。砂礫の投入質量と土層の容積から算定した乾燥密度は、砂層で1.46～1.56Mg/m³、礫層で1.69～1.80Mg/m³であった。

図8は、砂と礫の粒径加積曲線である。平均粒径はそれぞれ0.3mmと5mmである。図9(a)には、土柱法で測定した砂と礫の水分特性曲線を示す。測定値を van Genuchten 式にあてはめ、不飽和透水係数を推定すると、図9(b)のようになる。砂の飽和透水係数は、供試体の密度を変えた室内透水試験の結果から、造成地盤の平均密度1.51Mg/m³に対応させて推定した。礫材の透水は非線形流れとなるため、動水勾配1の状態では飽和透水係数を測定した。図9(b)より、砂と礫の境界面のサクシオンが3cmから4cm程度になると、礫の透水性が大きくなり、砂層から下部の礫層への浸潤が開始することになる。しかし、図9(a)から分かるように、このような状態になるには、砂層の飽和度がほぼ100%に達する必要があるが、蒸発散をともなう地表散水条件では、礫層への浸潤はほとんど起こらない、つまり毛管障壁が十分かつ永続的に機能すると期待できる。

実験区画を造成したのち、7月11日にミズナ (商品名: 京みぞれ) を図7に示したラインに沿って5cm間隔で3粒ずつ播種し、7月28日に間引き、8月14日に収穫を行い、草丈、新鮮重および乾物重を測定した。播種から間引きまでの期間は前日の計器蒸発量の100%をジョウロで散水灌漑し、間引きから収穫までは節水灌漑とし、計器蒸発量の50%を与えた。この間、図7に示す区画内の位置で、挿入型水分計 Profile Probe PR1 (Delta Devices 社製) により、深さ40cmの範囲で土の体積含水率 θ をモニターした。

図10に、播種翌日から1週間ごとの地盤内の水分分布の変化を示す。砂のみのS区では、灌漑水が地盤の深いところまで浸潤しているのに対し、G10区およびG20区では、いずれも、土の毛管障壁機能により砂と礫の境界面の上部で浸潤した灌漑水が保持・貯留されている。G10区では、G20区に比べ、間引きからの節水灌漑の期間で地表面付近の水分量の減少が著しくなっている。これは、礫層の位置が浅く蒸発の影響を受けたためと考えられる。

図11は、収穫したミズナ (S区44本、G10区43本、G20区51本) の草丈、新鮮重および乾物重の平均値と標準偏差をまとめたものである。図中の英字a, b およびcはScheffe法 (石村と石村、2008) による多重比較検定の結果であり、異なる英字は区画間に統計的に有意な差 (有意水準5%) があることを意味する。S区とG10区、G20区との比較では、草丈、新鮮重および乾物重の全ての測定項目が、G10区とG20区で有意に

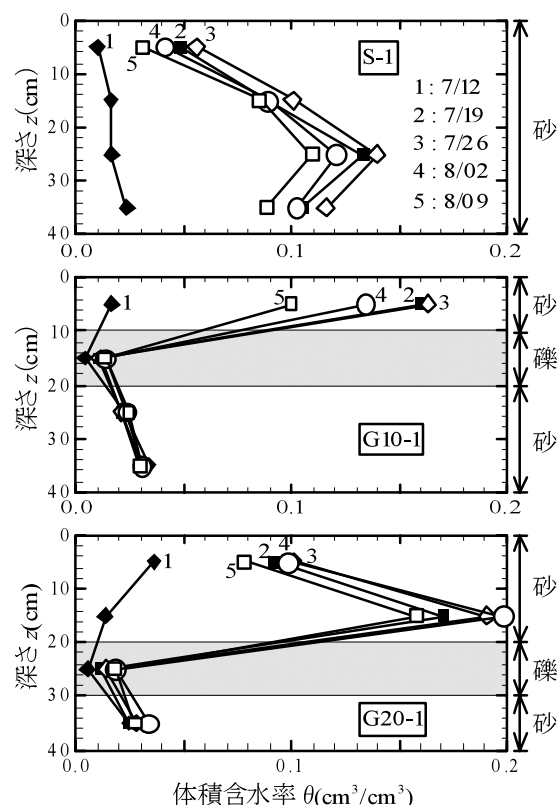


図10 地盤内の水分分布の変化

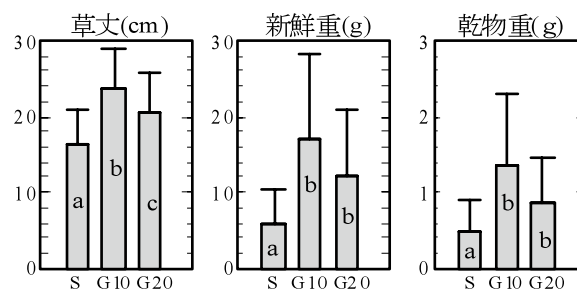


図11 ミズナの生育量および礫層の有無と敷設深さの影響

高くなっている。土の毛管障壁機能により貯留された水分が、植物の生育に有効に利用されたといえる。礫の敷設深さによる影響をG10区とG20区の比較でみると、G10区で草丈は有意に高く、また新鮮重と乾物重は平均的に高くなっているのが分かる。収穫したミズナの根が深さ10cm程度までの地表面付近で密であったことから、G20区では貯留された水分の分布位置が深く、根が十分に吸水できなかったためと推察される。

2. 土のキャピラリー・バリアを利用した節水かんがい法への展開

砂地盤に礫を敷設し、土の毛管障壁 (キャピラリー・バリア) 機能が植生量に及ぼす効果を調べた。地盤内に敷設した礫層の上部で、浸潤した灌漑水が定常的かつ効果的に捕捉されること、ならびに捕捉された水分量が植生量に統計的に有意な影響を及ぼすことが確認できた。土の毛管障壁機能を廃棄物の覆土や斜面減災工へ適用する場合、地盤中の浸潤水を確実に補足すると

ともに、捕捉した水分により被覆植生の生育を促進できるという二重の効果を持つことになる。半乾燥地開発等を想定する場合には、節水灌漑や雨水ハーベスティング技術として、制約された水資源を有効に利用できることになる。礫層による水分移動の遮断機能は、地下水からの毛管上昇に対しても働くことから、半乾燥地域で問題となっている塩分集積を効果的に制御できる可能性（藤井ら、2009）も合わせもつ。

まとめ

傾斜したキャピラリー・バリアのもつ浸透抑制機能を利用すれば、地盤に浸透した降雨水を表層部で効果的に捕捉し、地盤深部への浸潤を低減できるため、地山斜面やため池堤防斜面などの斜面すべり防止技術への展開が可能となる。一方、キャピラリー・バリアを地表面の近傍で平面状に敷設すれば、土壌水を根群域に保水できるため、節水農業の効率化が可能となる。このような土のキャピラリー・バリアがもつ雨水ハーベスティング機能に着目し、傾斜キャピラリー・バリアによる斜面減災工法、ならびに平面状キャピラリー・バリアによる節水かんがい法の現状を、既往の圃場実験に基づいてまとめた。次の結果および今後の展望を得た。

- (1) キャピラリー・バリア地盤の規模や構造を決定する際、限界長が重要な設計パラメータとなる。限界長の大きさには、構造因子として境界面の傾斜角、材料因子として砂と礫の不飽和水分特性、ならびに外的因子として浸潤強度（これには構造因子として砂層の厚さが関係する）が関与し、すでに、これらの因子を取り込んだ限界長の予測式がいくつか提案されている。その中で、Steenhuis らによる提案式が比較的精度が良いと考えられる。この提案式によると、理論的には5 m から50 m ほどの限界長が可能であるとされている。キャピラリー・バリア地盤の構造設計に関わる実務的な課題として、室内実験あるいは野外計測を通してさらに大きな限界長での検証が必要となっている。
- (2) 圃場で造成した砂層と礫層の層構造地盤における土中水分動態のモニターにより、降雨浸潤に対するキャピラリー・バリアの継続的な抑制効果を確認することができた。これにより、地盤深部への雨水浸潤が低減し、土の強度の低下あるいは自重の増大を抑制することができる。このようなキャピラリー・バリアがもつ雨水浸透抑制効果を利用すれば、自然地山斜面やため池堤防斜面を対象とした斜面すべり減災技術の開発が可能となる。
- (3) 植栽実験により、地盤内に敷設した礫層の上部で、浸潤した灌漑水が定常的かつ効果的に捕捉されること、ならびに捕捉された水分量が植生量に統計的に有意な影響を及ぼすことを確認した。半乾燥地域における節水灌漑や雨水ハーベスティング技術として展開が可能であり、制約された水資源を有効に利用できることになる。礫層による水分移動の遮断機能は、地下水からの毛管上昇に対しても働くことから、半乾燥地域で問題となっている塩分集積を効果的に制御できる可能性も合わせもつ。
- (4) キャピラリー・バリアは、用いられるのが砂と礫の自然材料であり、それ自身、自然環境への負荷が小さいという点で、優れて現代的な説得性をもつ。今後、キャピラリー・バリアの研究を通して、地盤工学あるいは不飽和土工学の環境事業分野における新たな展開を図ることができるのではないかと考える。

謝 辞

研究実験を進めるにあたり、ここ数年間にわたり、新潟大学農学部生産環境科学科卒業の上原り香さん、神田美沙さん、土屋裕輝君、門口隆太君、小松元太君および岩沢竜太君、新潟大学大学院自然科学研究科の松本智君、ならびに鳥取大学農学研究科修了の貴堂史子さんと藤井尚君から多くのかつ貴重なご協力をいただいた。一連の研究は、鳥取大学乾燥地研究センター井上光弘教授ならびに岡山大学大学院環境学研究科竹下祐二教授との共同研究として進めている。計測データの分析、あるいは理論的な考察にあたり、両氏からはつねづね適切なお助言、ご指導をいただいている。ここに記して、皆さんに深謝申し上げたい。科学研究費補助金の基盤研究 (B)「土のキャピラリー・バリア機能を利用した雨水資源の保全・活用技術の実用化提案」(課題番号 22380127)、および鳥取大学乾燥地研究センター共同利用研究より、多大な研究費支援をいただいている。合わせて、ここに記して、厚くお礼を申し上げたい。

参考文献

- 藤井尚・井上光弘・森井俊広. 2009. 毛管上昇に及ぼす成層土壌の影響. 第64回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨.
- 石村貞夫・石村光資郎. 2008. 入門初めての分散分析と多重比較. 東京図書.
- 郭桂芬・新家憲・賈会彬・張志剛・近江谷和彦・松田從三. 2006. アルカリ土壌の改良 (第1報) - 毛管現象の遮断. 専修大学地域総合科学研究センター報告, **1**: 57-72.
- 貴堂史子・井上光弘・森井俊広・藤井尚・土屋裕輝. 2009. 土のキャピラリー・バリアにより貯留された灌漑水の有効利用. 平成21年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集: No. 3-21.
- 小島倫直・宮崎 毅. 2004. 湾曲キャピラリー・バリアの限界長に関する研究. 農業土木学会論文集, **232**: 51-58.
- 小松元太・森井俊広・井上光弘・貴堂史子・藤井尚. 2010. 土の毛管障壁機能を利用した節水灌漑. 平成22年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集: No. 1-12.
- 松本智・森井俊広. 2009. 土のキャピラリー・バリア機能の応用展開に向けた研究. 新潟大学農学部研究報告, **62** (1): 35-40.
- 松本智・森井俊広. 2009. 土のキャピラリー・バリアを利用した斜面減災工の開発研究. 土木学会第64回年次学術講演会後援概要集: III -283.
- 宮崎 毅. 2000. 環境地水学. pp.126-130. 東京大学出版会, 東京.
- Morii, T., M. Inoue, Y. Takeshita and G. Komatsu. 2011. Effective water harvesting using capillary barrier of unsaturated soils. *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils*. (in print)
- 森井俊広・竹下祐二・井上光弘・松本智. 2009. キャピラリー・バリア地盤における雨水浸潤挙動の現地計測と限界長の評価. 農業農村工学会論文集, **263**: 91-97.
- 森井俊広・小松元太・井上光弘・竹下祐二. 2010. 土の毛管障壁機能を利用した圃場規模の雨水ハーベスティング. 第45回地盤工学研究発表会平成22年度発表講演集: 913-914.
- 日経コンストラクション. 2004. 汚染水の浸出を防止 砂とれきで雨水の浸透を遮断する. 日経コンストラクション, **350**: 36-39.

- Rahardjo, H., Krisdani, H. and Leong, E.C. 2007. Application of unsaturated soil mechanics in capillary barrier system. *Proceedings of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils* edited by Yin, Z., Yuan, J. and Chiu, A. C. F.: 127-137.
- Ross, B. 1990. The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, **26**(10): 2625-2629.
- Smesrud, J. K. and Selker, J. S. 2001. Effect of soil-particle size contrast on capillary barrier performance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(10): 885-888.
- Steenhuis, T. S., Parlange, J.-Y. and Kung, K.-J. S. 1991. Comment on "The Diversion Capacity of Capillary Barriers" by Benjamin Ross. *Water Resources Research*, **27**(8): 2155-2156.
- Stephens, D. B. 1996. Vadoze Zone Hydrology. pp.183-187. CRC press, Inc.
- 上原るり香・神田美沙・森井俊広. 2009. 土の毛管遮断機能と植生による雨水浸透抑制. 新潟大学農学部研究報告, **61**: 175-180.
- Walter, M. T., Kim, J.-S., Steenhuis, T. S., Parlange, J.-Y., Heilig, A., Braddock, R. D., Selker, J. S. and Boll, J. 2000. Funneled flow mechanisms in a sloping layered soil: Laboratory investigation. *Water Resources Research*, **36**(4): 841-849.
- 渡辺邦夫. 1992. 古墳土構造に見る不飽和浸透流制御. 土と基礎, **40**(1): 19-24.

Feasible Study of Rainwater Harvesting Using Capillary Barrier of Soil

Toshihiro MORII^{1*}, Ryuta KADOGUCHI², Genta KOMATSU³ and Satoshi MATSUMOTO⁴

(Received January 20, 2011)

Summary

Capillary barrier is the simple soil layer system which is composed of the fine soil (sand) layer underlain by the coarse soil (gravel) layer. The capillary barrier soil was constructed in the natural sand slope, and the volumetric moisture contents in the soil were successfully measured together with precipitations for about four months. Soil moisture changes in the gravel layer were well compared those in the sand layer to confirm a practically excellent divergence of infiltration water along the tilted interface between the sand and gravel layers. The percolation or breakthrough of the water flow along the interface into the gravel layer was also observed. The divergence length of the capillary barrier where the percolation or breakthrough into the gravel layer occurs was estimated using the soil properties determined by the laboratory tests and the structural configuration of the capillary barrier soil. A fairly good correspondence of the divergence length between the observation and the estimation demonstrated a practical effectiveness of the equation proposed by Steenhuis, Parlange and Kung (1991). It may be concluded in the study that the capillary barrier soil system is possibly adaptable to the effective measures for slope protection of natural soil or embankment. There is only a few studies related to this alternative measures for the slope protection. Rahardjo, Krisdani and Leong (2007) have proposed to use the capillary barrier as a soil cover for slope stabilization in tropical region, in which rather steep inclination of soil layers and high rainfall intensities are pointed out to be discussed. A multi-layered soil system of sand and gravel may be recommended to divert the infiltrated water along the interfaces completely and safely. A plant cover over the soil surface will decrease an amount of rain infiltration, and prevent soil surface deterioration of the capillary barrier soil due to raindrop erosion.

A simple soil layer system which is composed of a fine soil layer underlain by a coarse soil layer has a characteristic property of capillary barrier. Water infiltrated into soil is stored just above an interface between the fine and coarse soil layers due to a physical difference in water retention characteristics of the fine and coarse soils. As their roots can easily utilize the water stored in the upper soil layer, plants grow effectively even under water saving irrigation. In the study, an effect of water stored in the upper soil layer by the capillary barrier of the soil layer system on the plant growth was investigated in the sand soil field. Six experiment plots, each 70 cm wide and 90 cm long, were excavated into the depth of 40cm and veneer sheets were placed to retain soil wall, then the sand soil was filled back into the first two of six experiment plots along all the depth. A gravel layer 10 cm in thickness was placed at depth of 10 cm in other two experiment plots and at depth of 20 cm in the remaining two experiment plots. Potherb Mustard was seeded and thinned after about three weeks in all the experiment plots. Soil water changes in the experiment plot were measured after the plant seeding. At about 35days after the plant seeding, Potherb Mustard was harvested to measure plant height as well as dry mass of plant. It is found that the infiltration water was effectively stored in the upper soil layer by the capillary barrier of the soil layer system, and the water stored in the upper soil layer affects significantly the plant growth. Further studies are required to examine the effect of the capillary barrier of soil on the plant nutrition and to investigate the barrier property against salt concentration caused by capillary rise of groundwater.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 63(2):99-107, 2011

Key words : Capillary barrier of soil, Rainwater, Hydraulic properties of unsaturated soil

¹ Faculty of Agriculture, Niigata University, Niigata

² Rural Development Bureau, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan

³ Nagano Regional Office, Nagano Government Prefecture, Nagano

⁴ Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Niigata, and Department of Civil Engineering, Niigata Government Prefecture, Niigata

* Corresponding author: morii@agr.niigata-u.ac.jp