土のキャピラリー・バリア機能の応用展開に向けた研究

松本　智[1]・森井俊広[2*]

（平成21年７月13日受付）

要　約

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・バリアがもつ応用展開の可能性に着目し、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・バリアによる節水農法の現状を、既往の圃場実験に基づいてまとめた。

新大農研報, 62(1):35-40, 2009

キーワード：土のキャピラリー・バリア、斜面減災、節水農業、圃場実験、土中水分

キャピラリー・バリアは、砂層とその下部に礫層を重ね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（間隙サイズ）に伴う保水性の違いにより、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バリアとして機能し、それ以深の領域への水の浸入が抑制される。

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・バリアがもつ応用展開の可能性に着目し、本研究では、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・バリアによる節水農法について現状をまとめる。

キャピラリー・バリアの実務分野への展開例はあまり多くない。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、残念ながら見当たらない。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。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技術といえる。また、キャピラリー・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。

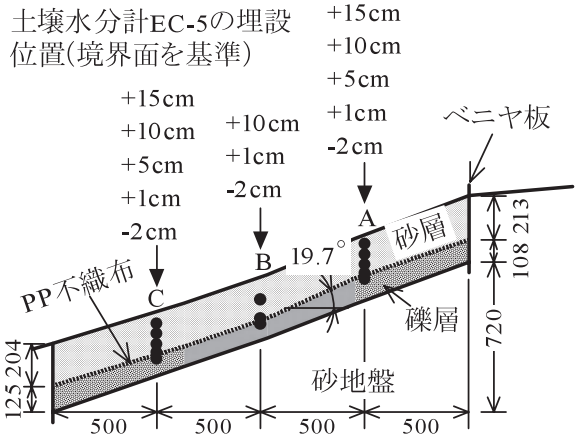
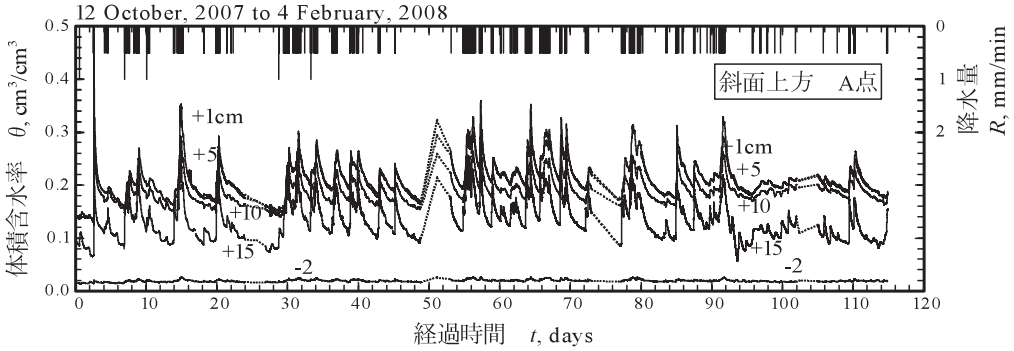


図１．砂地斜面に造成したキャピラリー・バリア地盤

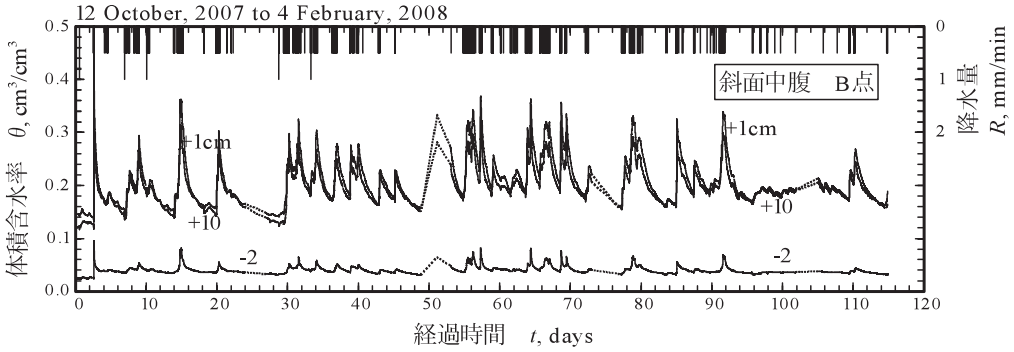
[1] 新潟大学大学院自然科学研究科・新潟県土木部

[2] 新潟大学自然科学系（農学部）

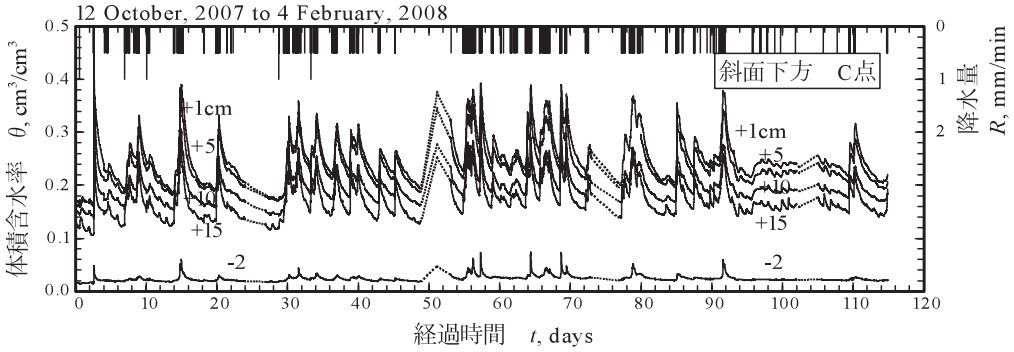
* 代表著者 : morii@agr.niigata-u.ac.jp



(a) 斜面上方部での計測結果



(b) 斜面中腹部での計測結果



(c) 斜面下方部での計測結果

図２．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

傾斜キャピラリー・バリアによる斜面減災工法の開発

１．キャピラリー・バリアを用いた斜面減災工法の概要

先に述べたように、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・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。

２．現地計測による雨水遮断機能の確認

図１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（硅砂）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ECH$_2$O誘電率計モデルEC-5（Decagon Devices社製）を用いた。

図2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1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。

3．現地計測による限界長の推定

図2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2には、限界長に関する情報が計測されていることになる（松本ら、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いる。Smesrud and Selker（2001）および小島と宮崎（2004）によると、このうち、Steenhuis and Parlange（1991）の提案式が実務的であるとされている。地盤に浸潤するフラックスqが砂層の透水係数Ksに比べ十分に小さい場合、この提案式は次のように示される。

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

ここで、Lは限界長（水平距離）、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α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、

$$K = K_s \qquad h < h_a;$$
$$K = K_s\exp\left[-\alpha(h-h_a)\right] \quad h \geq h_a \qquad (2)$$

図3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）にしたがって飽和に近い領域でαを求めると、0.077cm^{-1}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 = 8.2 × 10^{-3}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 = 0.5mm/minとみなし、これらの値を式（1）に代入すると、Lは99cm程度と計算される。図1に示した断面図から、斜面上方部の計測位置Aは、集積流が始まる斜面上端部より水平距離50cmにあり、Lに比べ短いため、破過はまだ生じない。

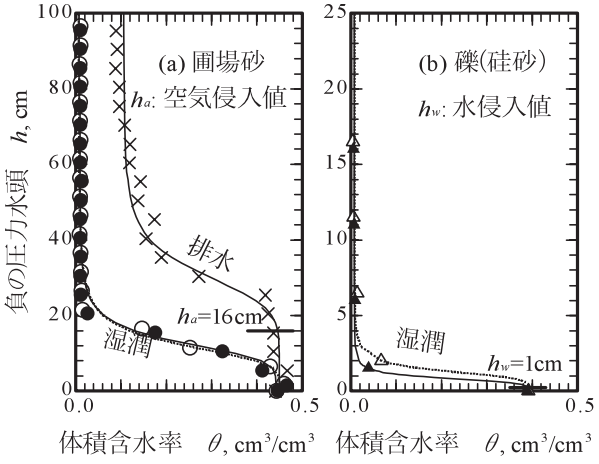


図3．キャピラリー・バリア斜面に用いた砂と礫の水分特性曲線

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100cmとなることから、破過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（松本と森井、2009）。

4．キャピラリー・バリアを利用した斜面減災工の展開について

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 and Parlange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。

平面状キャピラリー・バリアによる節水農法の開発

1．キャピラリー・バリアを利用した節水農法の概要

砂層とその下部に礫層を重ねた地盤層は、互いの水分保持特性の相対的な違いにより、キャピラリー・バリア機能を発揮する。灌漑あるいは降雨により下方浸潤が生じると、キャピラリー・バリアにより、砂層と礫層の境界面の上部で浸潤水が保持･貯留される。灌漑水を不必要に下層へ浸潤させることなく、有効に植物生育に供することができるため、節水の効果が期待できる。本章では、土のキャピラリー・バリア機能によって貯留された水分による作物の生育促進の効果を、圃場における植栽実験（貴堂ら、2009）により調べた。

2．圃場の造成と植栽実験

図4に示すように、ビニールハウス内の砂地圃場に、幅70cm ×長さ90cmの8個の実験区画を造成した。約4m× 2

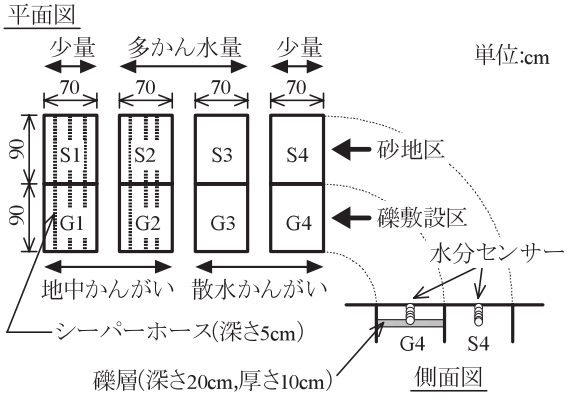


図４．植栽実験の造成プロット

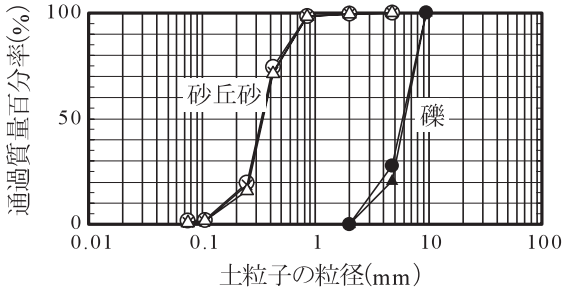


図５．植栽実験圃場に用いた砂と礫の粒径加積曲線

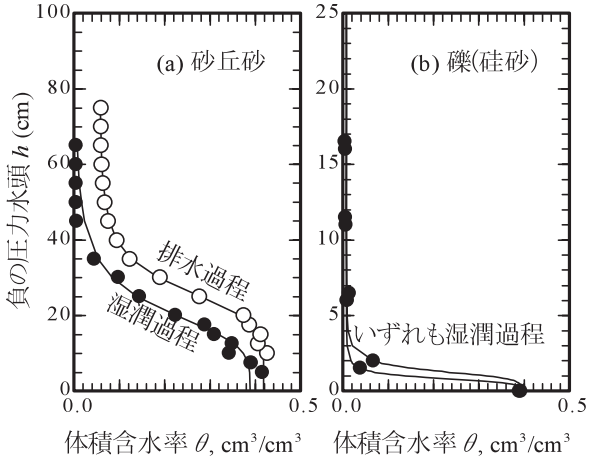


図６．植栽実験圃場に用いた砂と礫の水分特性曲線

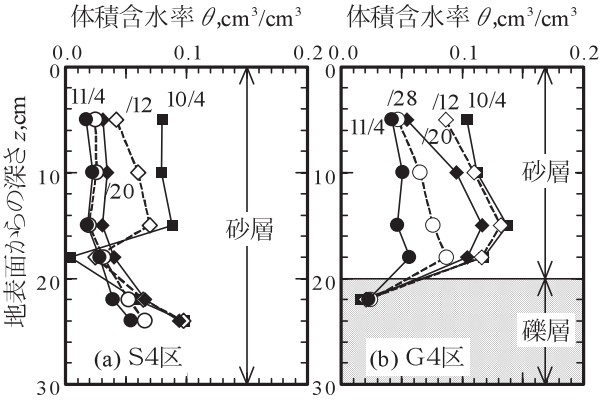


図７．植栽実験圃場における土中水分量の深さ方向分布

m の区画をいったん深さ 30cm に掘削したのち、G 1 ～ G4 区画では、礫材（硅砂１号）を厚さ 10cm に敷設したのち、掘削した砂を埋め戻した。S 1 ～ S 4 区は、掘削した砂をふたたび埋め戻した。いずれも、砂の埋戻しに際して基肥と殺虫剤を混合した。投入質量と土層の容積から算定した礫層の乾燥密度は平均 1.81g/cm^3、定容積採土から求めた砂地盤の乾燥密度は平均 1.5g/cm^3 であった。図５は、砂と G 区に用いた礫の粒径加積曲線である。平均粒径は砂で 0.25mm、礫で６mm となっている。図６には、土柱法で測定した砂と礫の水分特性曲線を示す。砂の空気侵入値は約 16cm、礫の水侵入値は約１cm であった。

実験因子として、礫層の有無（つまり G 区と S 区の別）に加えて、灌漑方法と灌漑水量を考慮した。このため、図４の S1、S2 と G1、G2 の区画では、深さ５cm に埋設したシーパーホースによる地中灌漑、その他の区画ではジョウロによる散水灌漑を採用した。また、S2、S3 と G2、G3 区画では灌漑水量を蒸発散量の１／２程度、その他の区画では１／４程度を目安に設定した。実験区画を造成したのち、ミズナ（商品名：京みぞれ、タキイ種苗株式会社）を 2008 年９月 26 日に播種し、10 月 21 日に間引き、11 月２日に収穫を行い、草丈、新鮮重および乾物重を測定した。この間、G4 区画および S4 区画において、地盤内に埋設した土壌水分センサー（Theta Probe SM200 および ML2x）により深さ方向の θ をモニターした。

３．植栽実験の結果

図７に、播種から収穫に至るまでの期間に、砂のみの S4 区ならびに礫を敷設してキャピラリー・バリア機能を持たせた G4 区で測定した地盤内の深さ方向の θ の変化を比較する。S4 区の 10 月４日および 12 日の測定値で、深さ 18cm 位置の θ が低くなっているのは、天日により極端に乾燥した砂を埋戻してしまったためである。その後の散水灌漑の継続によりこの深さ位置にも水分がまわるようになり、収穫近くの 10 月下旬から 11 月上旬にかけては、表層付近で水分量が少なく、深部になるにつれ増加する水分特性曲線に類似した一般的な水分分布となっている。これに対し、礫を敷設した G4 区では、砂層と礫層の境界面の上部領域で多くの水分が保持・貯留された。境界面の直ぐ下の礫層内の測定位置では θ がほとんど変化していないことから、砂層内に貯留された水分は植物の生育に利用されるとともに蒸発によっても消費されていったと判断される。

図８は、収穫したミズナの草丈、新鮮重および根の新鮮重の測定結果である。いずれも、各試験区で収穫した６本の植生の平均値である。これらの生育量に対して、実験因子である灌漑方法、灌漑水量および礫の有無の影響を分散分析により調べると、図８に p 値として併記したとおりである（それぞれの因子を方法、水量および礫と略記する）。草丈に対し、礫の有無、つまりキャピラリー・バリア機能が統計的に有意な影響を持っ

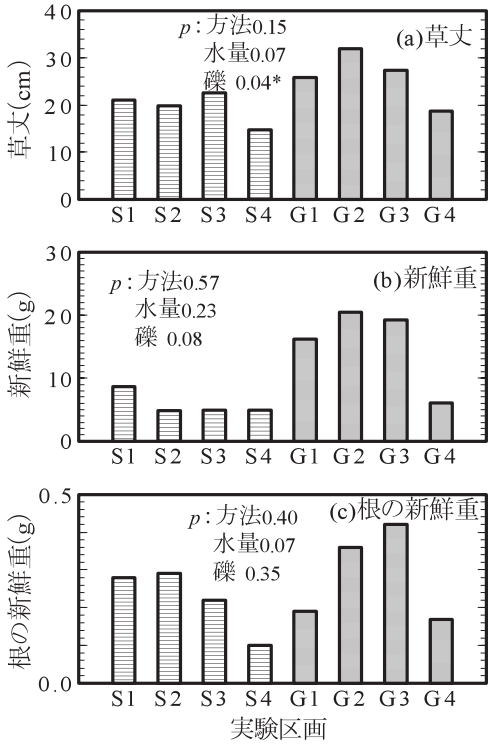


図８．播種後約２ヶ月で収穫したミズナの生育量

ていることがわかる。新鮮重に対しても、統計的な有意性はないが、相対的に影響度は高いといえる。しかしながら、根の新鮮重に対してはまったく影響がない結果となった。収穫した根の分布深さが約７cm であり、図７から分かるように、貯留された水分を必ずしも有効に利用できる状況にはなかったことが一因しているとも推察される。

４．キャピラリー・バリアを利用した節水農業の展開について

砂地地盤に礫を敷設し、土のキャピラリー・バリア機能が植生の生長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、ならびにキャピラリー・バリア機能によって捕捉された水分量が植生の草丈に統計的に有意な影響を及ぼすことを確認できた。今後、植生の根域を考慮して、礫層の敷設深度を変えた実験を継続して行う必要があるかと考える。礫層による水分移動遮断機能は、地下水からの毛管上昇に対しても働き、塩分集積を効果的に制御できる可能性を持つ。この特性について検討を加えていく価値は大きいと考える。

参考文献

郭桂芬・新家憲・賈会彬・張志剛・近江谷和彦・松田従三. 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.

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. 第64回年次学術講演会後援概要集、Ⅲ-283.

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, EC. 2007. Application of unsaturated soil mechanics in capillary barrier system. *Proceeding of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils edited by Yin, Z., Yuan, J. and Chiu, A. C. F.*, 127-137.

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**：885-888.

Steenhuis, T. S. and Parlange, J. -Y. 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*. CRC press, Inc. pp. 183-187.

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.

Some Possible Perspectives on Field Application of Capillary Barrier of Soil

Satoshi MATSUMOTO[1] and Toshihiro MORII[2]*

(Received July 13, 2009)

Summary

Capillary barrier is the simple soil layer system which is composed of a fine soil (sand) layer underlain by a coarse soil (gravel) layer. Water which infiltrates into the soil can be well retained above the interface between the sand and gravel layers because of the difference in hydraulic properties of the soil layer materials. In the case of a tilting interface, the water retained moves downward along the interface between the soil layers. This waterproof by the capillary barrier of soil with the tilted interface decreases rainwater infiltration into the deeper soil, and keep a soil slope stable. This special and attractive feature leads to a possible adoption of the capillary barrier as effective measures for slope protection of natural soil or embankment. On the other hand, in the case of a horizontal interface constructed in a farm field, water retained will be effectively consumed by plant growth. This water storage above the interface of the soil layers and within the plant root zone leads to another possible adoption of the capillary barrier as a water saving irrigation in the farm fields. In the paper, possible field applications of the capillary barrier of soil are reviewed based on results of some field experiments published previously.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 62(1):35-40, 2009

Key words : Capillary barrier of soil, Slope protection measure of soil, Water saving irrigation, Field experiments, Soil water

[1] Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Niigata, and Department of Civil Engineering, Niigata Government Prefecture, Niigata

[2] Institutes of Science and Technology (Faculty of Agriculture), Niigata University, Niigata

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