

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22380127

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Study on practical application of capillary barrier of soil to water harvesting and its effective use.

研究代表者

森井 俊廣 (MORII TOSHIHIRO)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：30231640

研究成果の概要（和文）：キャピラリー・バリア（CB）は、砂層とその下部に礫層を敷設した土層地盤をいう。両層土の保水性の違いにより、地表面からの浸潤水は境界面で遮断されるため、集積した水を作物生育に有効に利用できる。境界面に傾斜を付けると、集積水は傾斜方向に流下し、それ以深の領域への水の浸入を抑制できる。本研究では、野外実験を通して、CBを利用した浸潤水の制御技術と節水かんがい法に関する実用化検討を行い、農業、環境保全分野等への適用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Capillary barrier (CB) is a simple soil layer system which is composed of sand layer underlain by gravel layer. As water infiltrating from soil surface is retained above an interface between the soil layers, agricultural plants can easily utilize it for their growth. In the case of tilted interface, water retained flows downward along the interface, with the result that deeper soils under the interface can well avoid being infiltrated by soil water. In this study, an applicability of the CB system into an effective water use in agricultural irrigation and a soil water diversion were investigated through a series of field experiments. The study revealed that the CB system provides excellent performance of water harvesting and salinization prevention in soil, and is adaptable to an isolation facility of a hazardous waste material or a very low level radioactive waste.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
23年度	1,100,000	330,000	1,430,000
24年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	7,600,000	2,280,000	9,880,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：キャピラリー・バリア、土の不飽和水分特性、雨水資源の保全、浸潤水、限界長、塩類集積、廃棄物貯蔵

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化により降雨の発生時間と場所が偏在し局所集中化するようになった。世界的にみると、たとえばアフリカ地域では雨水だけに頼った天水農業がほとんどであり、降雨発生時の偏在や局所集中化により、深刻な食料不足が生じることが懸念される。しかし、

大型の水利施設を伴う大規模な水源開発は、多くの地域・国において、初期・維持管理コストの面から実行が難しくなっている。また、農地への過かん水など不適切なかんがいにより、土壌表層の塩類集積を起し、逆に環境を劣化させることもある。地球温暖化問題を契機に、農業生産性の向上と環境保全が両

立しうる、持続的な農業・農村開発がより強く求められるようになってきている。

本研究では、廉価でかつ環境調和性に優れた技術であり、特に半乾燥地域や荒蕪地帯における小規模かんがい農法として展開が期待できる雨水ハーベスティング技術を実用化するとともに、限られたかんがい水資源を効率よく利用できる節水かんがい法の開発に取り組む。

## 2. 研究の目的

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より、境界面の上部で降下浸潤水が捕捉され、集積する。この機能を土のキャピラリー・バリア（毛管障壁）という。境界面に傾斜をつけると、集積した水は傾斜方向に流下し、末端部で効率よく集めることができる。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、集積した水は植物生育に有効に利用される。本研究では、原型地盤での圃場実験を通して、(1)土のキャピラリー・バリア機能を利用した雨水ハーベスティング（捕水）技術ならびに(2)節水かんがい法の実用化に向けた検討を行う。節水かんがい法では、根群域の下部に一定厚さの礫層を敷設するため、地下水からの毛管上昇を遮断でき、塩類集積のリスクを低減できる可能性がある。このため、(3)土のキャピラリー・バリアによる地下水からの塩水上昇に対する遮断機能を、合わせて評価する。いずれも、自然材料を用いるため、廉価でかつ環境調和性に優れた技術であり、半乾燥地域・荒蕪地帯における小規模かんがい農法として展開が期待できる。

## 3. 研究の方法

### (1) 土のキャピラリー・バリアを利用した雨水ハーベスティングの検討

原型斜面にキャピラリー・バリア地盤を造成し、長期にわたる雨水浸透遮断機能と集水性能を明らかにした。境界面に沿って流れる集積流に地表面からの降下浸潤水が合流して砂の保水能力を超える量になると、キャピラリー・バリアは破れ、下部の礫層に向けて浸透が起きる。集積流の発生位置からこの点までの水平距離を限界長と呼ぶ。限界長は、下部への浸透が起きる前に集積水を集め、埋設排水管等を用いてこれを効果的に斜面外に排出し捕水する上で、重要な構造設計ファクターとなる。

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

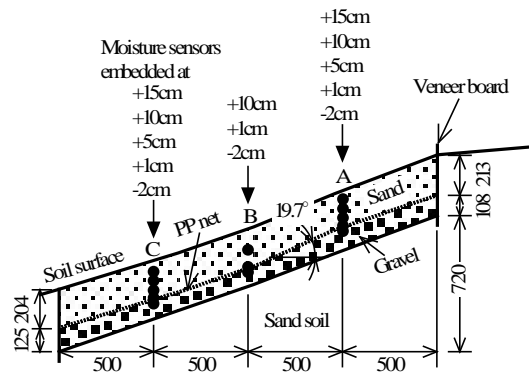


図1 圃場斜面に造成したキャピラリー・バリア(断面図)

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、水分量（体積含水率 $\theta$ ）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。 $\theta$ の計測には土壌水分センサーECH<sub>2</sub>O 誘電率計モデル EC-5（Decagon Devices 社製）を用いた。

### (2) 土のキャピラリー・バリアを利用した節水かんがい法の検討

図2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×2mの区画をいったん深さ30cmに掘削したのち、G1~G4区画で

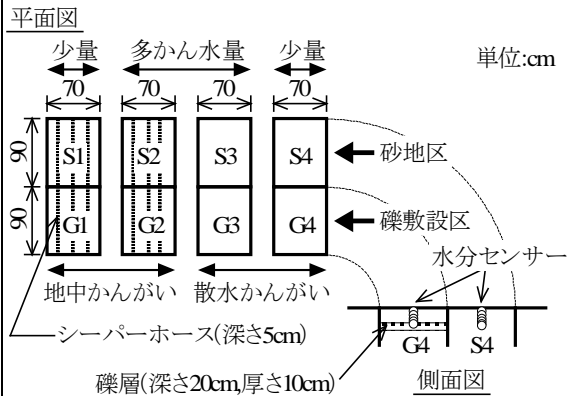


図2 実験圃場の区画と因子条件

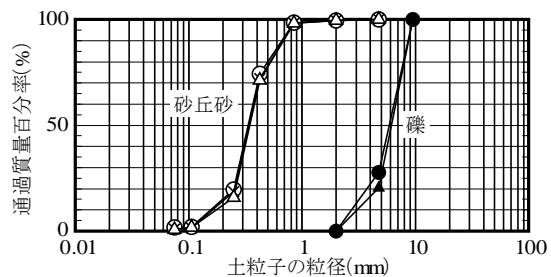


図3 実験区画に用いた砂と礫の粒径加積曲線

は、礫材（珪砂 1 号）を厚さ 10cm に敷設したのち、掘削した砂を埋め戻した。S1～S4 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  $1.81\text{g/cm}^3$ 、定容積採土から求めた砂地盤の乾燥密度は平均  $1.5\text{g/cm}^3$  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、かんがい方法とかんがい水量を考慮した。このため、図 2 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かんがいを採用した。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、9 月 26 日にミズナ（商品名：京みぞれ）を播種し、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）により深さ方向の体積含水率  $\theta$  をモニターした。

### (3) 地下水からの塩水上昇に対する遮断機能の評価

図 4 に示すように、ビニールハウス内で、原地盤（砂地盤）を 30cm 程度掘削したのち、内寸  $L610 \times W410 \times H315$  のコンテナボックス 9 個を、3 個ずつ直列状に配置し、実験プロットを準備した。3 個のコンテナボックスは、下部位置でビニールホースにより連結し、この直列を定水位給水ボックスにつないだ。定水給水ボックスは、ボールタップを利用して、一定水位の地下水を 9 個のコンテナボックスに供給できるようにしたもので、ボックス内の水位が下がると貯水タンクから自動的に不足水量が供給される仕組みになっている。コンテナボックスを設置したのち、底面から厚さ 16.5cm まで砂を埋め戻し、次いで、図 4 の左側直列 G50 では、厚さ 5cm に礫を敷設し、残り厚さ 10cm には再び砂を埋め戻した。右側直列の G24 では、厚さ 16.5cm まで砂を埋め戻したのち、その上に礫を厚さ 2.5cm で敷設し、残り厚さ 10cm は G50 と同じように砂を埋め戻した。中央の直列の S では、底部から厚さ 16.5cm になった後も、引き続き同じ砂を投入し埋め戻した。

地下水位は、一律、コンテナボックス底面から高さ 11.5cm になるように設定した。直列 S50 と S25 では、地下水面と敷設した礫層の底面との間隔は 5cm となり、砂の毛管上昇高さ 10cm に比べて十分に短い距離となっている。地下水として供給する水には塩化ナトリウムを加え、質量比で 10,000ppm の塩分濃度

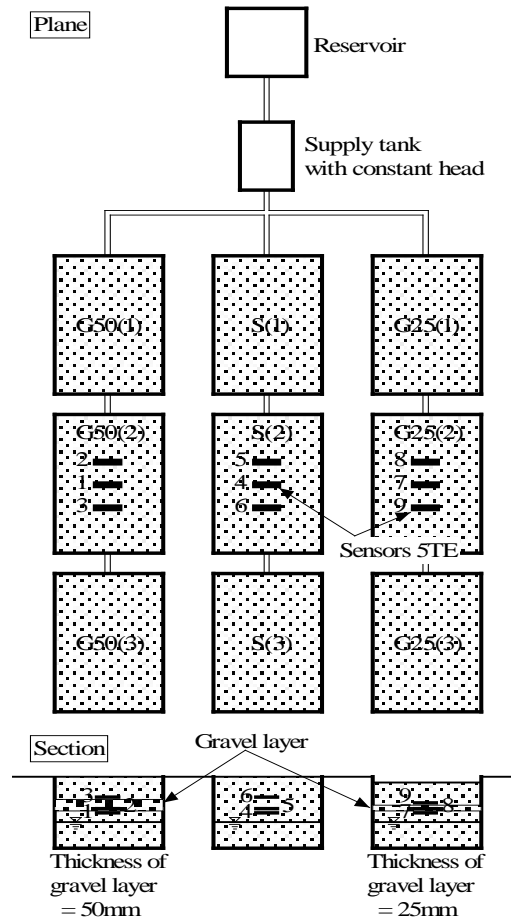


図 4 塩水制御実験の植栽用コンテナボックスの配置と地下水供給

とした。地下水面からの塩水の毛管上昇と礫層による遮断機能をモニターするため、G50 と G25 の直列中央のコンテナボックスでは、礫層底面より 1cm 直下の下部砂層内、礫層底面より 1cm 上の礫層内、ならびに礫層上面より 1cm 上の上部砂層内の 3 か所に、土壌水分・EC・温度センサー 5TE（Decagon Devices 社製）を埋設した。砂のみの地盤である S の直列中央のコンテナボックスでは、G50 と同じ深さ位置にセンサーを埋設した。

## 4. 研究成果

### (1) 土のキャピラリー・バリアを利用した雨水ハーベスティングの検討

図 5 に、 $\theta$  の変化をまとめる。上段と下段の図は、それぞれ、斜面の上方部（図 1 の A 位置）と中腹部（同じく B 位置）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  $\theta$  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、上段と下段の図を比較すると、礫層の水分量の変化に

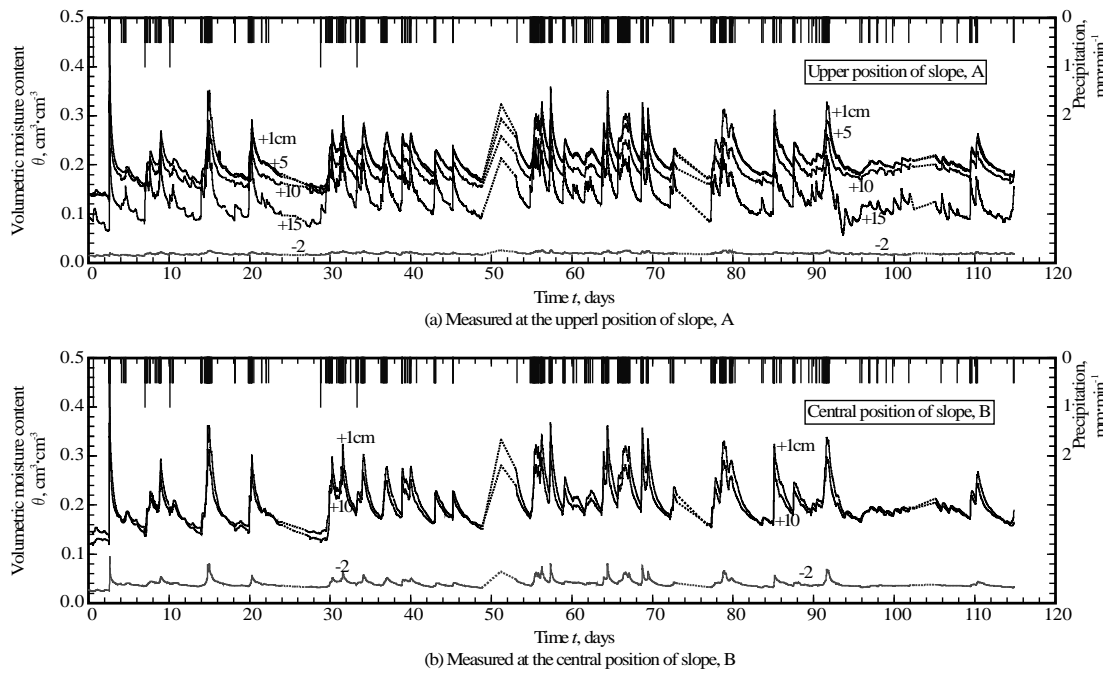


図5 造成したキャピラリー・バリア地盤内の水分量変化と限界長の観察

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 位置では、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 位置での計測結果では、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 位置に比べ高くなっている。降雨時の礫層の  $\theta$  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  $L$  に関する情報が計測されていることになり、斜面上端部から斜面中腹部の B 位置までの水平距離より、 $L$  はおよそ 100 cm 程度となる。これまでに提案されている Steenhuis らの式からは、 $L=95\text{cm}$  となり、この式により限界長を実務的な精度で推定できる可能性が大きいといえる。

(2) 土のキャピラリー・バリアを利用した節水かんがい法の検討

図 6 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  $\theta$  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  $\theta$  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  $\theta$  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 7 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 6 本の植生の平均値）。これらの生育量に対して、実験因子であるかんがい方法、かんがい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 7 に  $p$  値として併記したとおりである。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ていることがわかる。

(3) 地下水からの塩水上昇に対する遮断機能の評価

図 8 に、5TE で測定した体積含水率  $\theta$  と電気伝導度 EC の時間変化を示す。すべてのコ

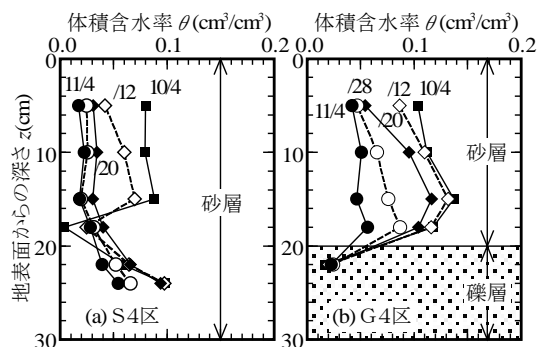


図 6 地盤内の水分分布

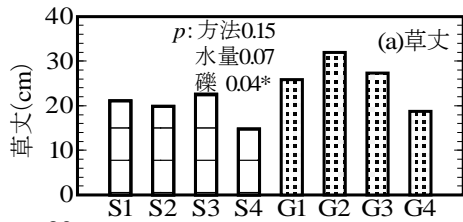


図7 播種後約2カ月で収穫したミズナの生育量 (草丈のみ表示)

ンテナボックスに地下水が供給されるようになった1週間目あたりより、G25(2)およびG50(2)において、礫層より下の下部砂層で、地下水面からの毛管上昇により $\theta$ とECが急増し、2週間目あたりでほぼ飽和に近い含水状態に達しているのが分かる (G25(2)ではセンサー番号7番、G50(2)ではセンサー番号1番)。しかし礫層内 (それぞれセンサー番号8番、2番) では、湿気により多少の微増はあるものの $\theta$ はほとんど変化しておらず、ECでみると塩分の侵入 (上昇) はまったく認められない。センサー番号9番と3番のECは、ほとんどゼロを指しており、したがって、礫層の上部の $\theta$ の増加には、下部砂層から礫層を通過してくるような水分は全く含まれていない、つまり地下水面からの毛管上昇が礫層によって完全に遮断されているのを確認することができる。礫層を敷設していない砂層のみのS(2)では、地表かん水の浸潤と地下水面からの毛管上昇によりかなり高い含水状態になっており、ECの変化からいうと、G25(2)とG50(2)に敷設されている礫層より高い位置まで塩分の上昇が生じているのが分かる。これに応じて、中央の配置Sでは、すべてのミズナが枯死している。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計16件)

1. Toshihiro MORII, Tetsuya SUZUKI, Takayuki KAWAI, Kaoru KOBAYASHI and Kazunobu MATSUMOT: Performance of Capillary Barrier System Included in Test Shallow Land Waste Repository, Bulletin of the Faculty of Agriculture Niigata University, 査読無, 65(2), 2013, pp.179-186.
2. Toshihiro MORII, Kaoru KOBAYASHI, Satoru NAKAFUSA, Kazunobu MATSUMOTO, Tetsuya SUZUKI and Takayuki KAWAI: Practical application of capillary barrier of soil into a shallow land waste repository, Proceedings of the 5th China-Japan Geotechnical Symposium, Chengdu, China, Oct. 11-12, 査読有, 2012, pp.379-385, 2012.
3. 小林薫・松元和伸・森井俊広・中房悟: 潮位変動に伴う不飽和砂地盤内の塩と水の同時移動に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), 査読有, 68(2), pp.1141-1145, 2012.
4. Toshihiro MORII, Mitsuhiro INOUE, Genta KOMATSU, Ryota KADOGUTI and Yuji TAKESHITA: Effective water harvesting using capillary barrier of unsaturated soils, Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, 29 Feb., 1-2 March, 2012, Thailand, 査読有, Vol. 2, pp.857-860, 2012.
5. Toshihiro MORII, Mitsuhiro INOUE, Kaoru KOBAYASHI, Suzuki TETSUYA and Takayuki KAWAI: Water harvesting and salinization prevention by capillary barrier of

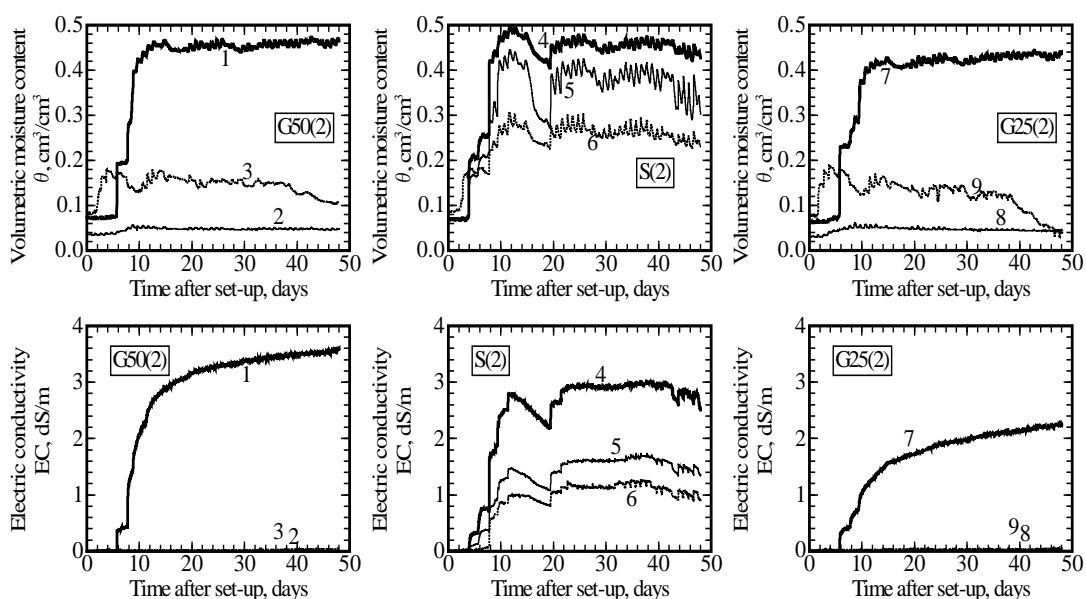


図8 地盤内で測定された体積含水率(上段の3図)および電気伝導度(下段の3図)の経日変化

- soil, Second international Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 14-16, 査読有, 2012, pp.747-752, 2012.
6. Toshihiro MORII, Kawai TAKAYUKI, Tetsuya SUZUKI, Kaoru KOBAYASHI, Nobuyuki MATSUMOTO and Satoru NAKAFUSA: Practical proposal of shallow land waste repository constructed using capillary barrier of soil, 平成 24 年度不飽和土研究会研究発表論文集, 2012 年 9 月 24 日-25 日, 東京農工大学, 査読無, 2012, pp.52-58.
  7. 松元和伸・小林薫・森井俊広: 建設重機により破砕した貝殻のキャピラリー・バリア礫代替材としての適用性, 第 57 回地盤工学シンポジウム平成 24 年度論文集, 地盤工学会, 2012 年 11 月 22 日, 査読有, 2012, pp.235-238.
  8. 森井俊広: 土のキャピラリーバリア, 地盤工学会誌, 査読有, 59(2), 2011, 50-51.
  9. 森井俊広・門口隆太・小松元太・松本智: 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, 新潟大学農学部研究報告, 査読無, 63(2), 2011, pp.99-107.
  10. Toshihiro MORII, Mitsuhiro INOUE and Yuji TAKESHITA: Green technological effect of capillary barrier of soil on agricultural plant growth, Proceedings of the Second Japan-Korea Joint Workshop on Unsaturated Soils and Ground, 査読有, 2011, pp.249-256.
  11. Satoru NAKAFUSA, Kaoru KOBAYASHI, Toshihiro MORII and Tomoyoshi NISHIMURA: Alternative employment of crushed shell particles in capillary barrier of Soil, International Journal of Geotechnique, Construction Materials and Environment, 査読有, 1(1), 2011, pp.50-55.
  12. 小林 薫・西村友良・森井俊広・中房悟: 水産系副産物(貝殻)のキャピラリーバリアへの有効活用に関する基礎的研究 ―破砕した貝殻の保水性について―, 地盤工学会誌, 査読有, 59(7), 2011, pp.14-17.
  13. 小林薫・中房悟・西村友良・森井俊広: 水産系副産物(貝殻)の保水性に着目した土質代替材への利用に向けた基礎的研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, 67(2), 2011, pp.382-387.
  14. 井上光弘・森井俊広・斉藤広隆・藤巻晴行: キャピラリーバリアによる混群域の保水性向上と地下水からの塩水侵入阻止, 土壤水分ワークショップ論文集, 査読有, 2011, pp.22\_1-8.
  15. Satoru NAKAFUSA, Kaoru KOBAYASHI, Toshihiro MORII and Yuji TAKESHITA: Estimation of water diversion provided by capillary barrier of soils, Proceedings of the Fifth Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, 査読有, 2, 2011, pp.773-777.
  16. Toshihiro MORII, Mitsuhiro INOUE, Genta KOMATSU, Ryuta KADOGUCHI and Yuji TAKESHITA: Effective water harvesting using capillary Barrier of unsaturated soils, Proceedings of the Fifth Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, 査読有, 2, 2011, pp.857-860.
- [学会発表] (計 20 件)
1. 森井俊広・高橋幸平・鈴木哲也・河合隆行・小林薫・松元和伸: キャピラリーバリアを導入した盛土式廃棄物貯蔵施設の試験施工, 平成 25 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 2013 年 9 月 3-5 日, 東京.
  2. 森井俊広・小林薫・松元和伸・河合隆行・鈴木哲也: キャピラリーバリアシステムを試験導入した盛土式廃棄物貯蔵施設の性能, 第 48 回地盤工学研究発表会平成 24 年度発表講演集, 2013 年 7 月 23-25 日, 富山市.
  3. 森井俊広・鈴木哲也・河合隆行・小林薫・中房悟: 土のキャピラリー・バリア機能を利用した盛土による汚染廃棄物の貯蔵保管工法の提案, 農業農村工学会京都支部第 69 回研究発表会講演要旨集, 2012 年 11 月 21 日, 新潟市.
  4. 井上光弘・斎藤広隆・森井俊広・藤巻晴行: 数値計算によるキャピラリーバリアの評価, 土壤物理学会講演要旨, 2012 年 11 月 2 日, 帯広市.
  5. 小林薫・松元和伸・松田浩朗・森井俊広: 重機で破砕した貝殻と砂材で構成されたキャピラリーバリアの限界長に関する検討― 実施工に向けたホタテ貝殻の破砕と同時転圧の可能性 ―, 日本地下水学会 2012 年秋季講演会講演要旨, 2012 年 9 月 27 日-29 日, 鹿児島市.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
森井 俊廣 (MORII TOSHIHIRO)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号: 30231640
  - (2) 研究分担者  
井上 光弘 (INOUE MITSUHIRO)  
鳥取大学・乾燥地研究センター・その他  
研究者番号: 90032309  
竹下 祐二 (TAKESHITA YUJI)  
岡山大学・環境生命科学研究所・教授  
研究者番号: 90188178