

論文

マルチング材料としての 粉碎汚泥焼成煉瓦の有効活用について

河井 克之^{※)} 佐伯 拓也^{※※)}
 野村 瞬^{※※※)} 杉山 友理^{※※※※)}
 飯塚 敦^{※※※※※)}

1. はじめに

地盤の塩分濃度が上昇すると植物が地盤から水分を吸収することができずに生育を阻害され枯死に至り、やがて土地の不毛化が生じる。これが塩害による沙漠化である。塩害は、乾燥地、半乾燥地のように、降水量に比べて蒸発量が多い地域で頻発し、地中の溶解塩類が地表面に集積することで生じる。降水量に関しては、計測方法も確立しており、地盤への浸透量を知ることは容易である。一方、自由水面からの蒸発量や飽和地盤からの可能

蒸発量に関しては様々な推定式が提案されている（例えば、Penman¹⁾、Priestley & Taylor²⁾）ものの、地盤からの実蒸発量は土壤水分に大きく依存し、計測された例も少ない。しかしながら、この土壤水分の減少によって大きく蒸発量が低減される特性を利用したものがマルチングである。マルチングは、地表面に保水性の小さい異種材料層を設けることで、塩害抑制効果を期待する手法である。そのメカニズムについては、河井ら³⁾によって数値シミュレーションにより明らかにされている。河井らは、まず既往の土/水連成有限要素解析の枠組みに、

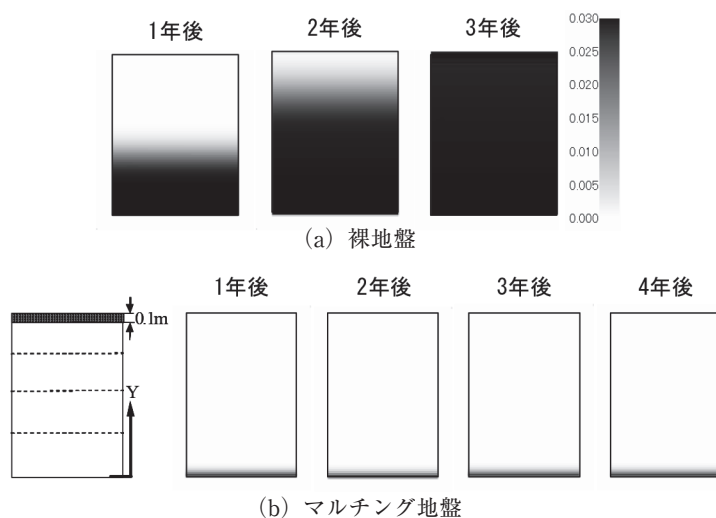


図1 乾湿繰り返しによる塩分移動シミュレーションから得られた濃度分布³⁾

※) 近畿大学理工学部 准教授 博士(工学)

※※) 株式会社神戸製鋼所

※※※) 海洋研究開発機構 技術研究員 博士(工学)

※※※※) 神戸大学大学院工学研究科

※※※※※) 神戸大学都市安全研究センター 教授 博士(工学)

(14)

物質輸送方程式を組み込むことで、地盤の変形、水収支、溶解物質移動を同時に表現できる解析手法を提案し、蒸発、降雨といった地表面に与えられる乾湿繰り返しが原因となる塩害を定量的に表現することに成功している。またマルチングを模擬した地盤での乾湿繰り返しシミュレーションを行い、マルチング層による実蒸発量低減が、地中での鉛直下向き流れを促進し、塩類上昇抑制につながると説明している（図1）。マルチングには、保水性の低い材料を用いるため、マルチング層は植物の育成には適していない。そこで、河井らはマルチング地盤上に原地盤材料層を設ける「改良型マルチング」を提案して

おり、塩害抑制に効果があることも示している。河井らは、一連の解析の中で、簡単のためPenman式に土壌の有効飽和度を乗じることで実蒸発量をモデル化しているものの、その妥当性については検証していない。

本研究では、実蒸発量に及ぼす地盤構成の影響について明らかにするために、2種類の試験を行った。まず実蒸発量に及ぼす各種要因を詳細に調べるためにミニスケール試験を行った。また、ライシメーター試験では異なる構成の地盤を模擬し実蒸発量を計測し、地盤構成による塩害抑制効果について検討を行った。

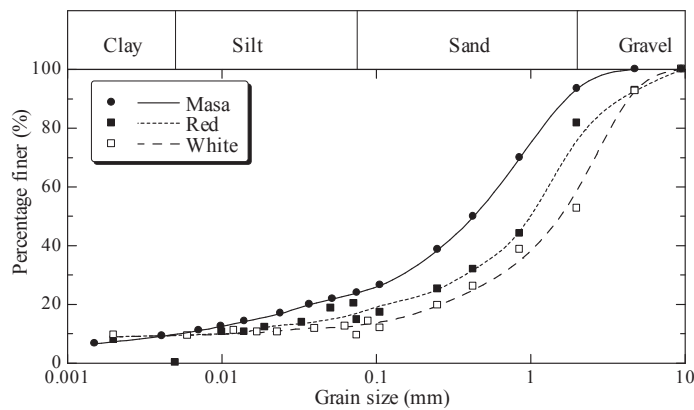
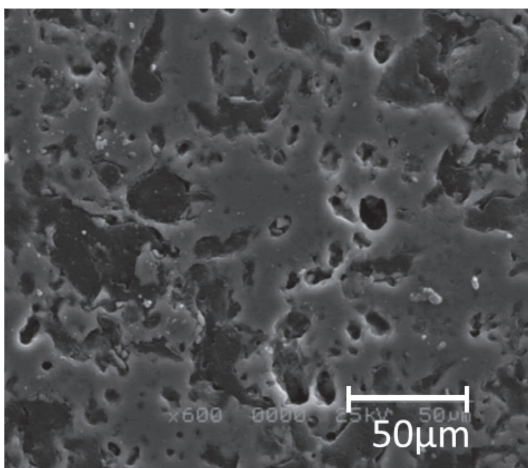
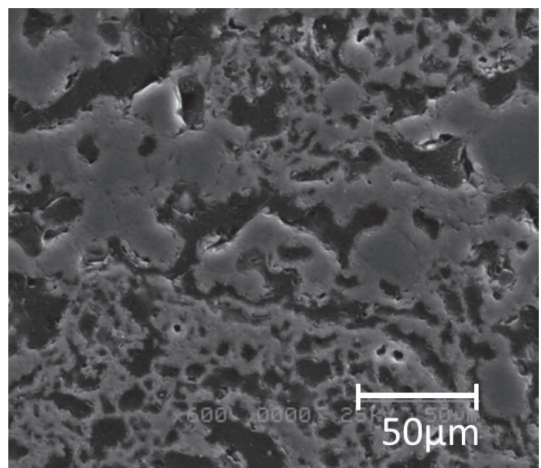


図2 試料の粒径加積曲線



(a) Red



(b) White

写真1 試料のSEM写真

2. 蒸発量計測試験

2.1 実験試料

本研究では、3種類の試料を実験に用いた。地盤材料として、建設用地盤材料としてよく用いられるまさ土、マルチング材料として汚泥焼成煉瓦を粉砕したものをを用いた。汚泥焼成煉瓦は、汚泥発生場所の異なる2種類を用意し、見た目からRed、White試料として区別する。それぞれの粒径加積曲線を図2に示す。まさ土に比べて、2種類のマルチング材料は粒径が大きく、特にWhite試料は礫分をより多く含んでいるのが分かる。両試料とも、写真1に示すように粒子自身に微小な空隙を有しており、軽質な材料である。図3に別途行った保水性試験の結果から得られた水分特性曲線を示す。まさ土と比べると、2種類のマルチング材料とも保水性が十分に低く、粒度が幾分よいことからWhite試料の方が含水率に対して広いサクション領域を有することが分かる。

2.2 ミニスケール試験

実蒸発量に及ぼす種々要因の検討を行うために、ミニスケール試験を行った。ミニスケール実験ではアクリル容器（蒸発面150mm×180mm）にまさ土試料を充填し、直射日光のあたる条件で放置し、時間経過による重量変化を蒸発量として算出した。ここでは、試料充填時の土壌水分量、乾燥密度、層厚を調整し、同時に蒸発量を計測することで、その影響を比較した。写真2にミニスケール試験の様子を示す。

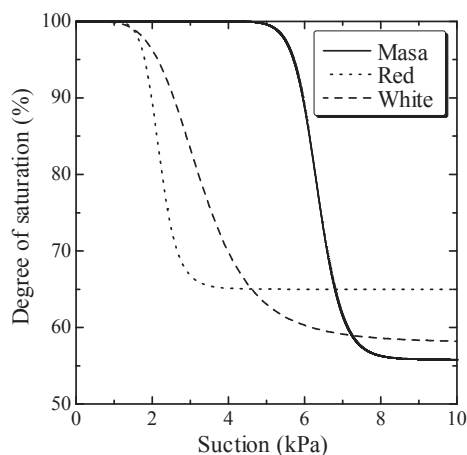


図3 試料の水分特性曲線

2.3 ライシメーター試験

ライシメーターを用いて種々の地盤を形成し、実地盤を模擬した蒸発量計測を行った。ライシメーターは充填した土壌の重量変化を精緻に計測できる試験土槽の事であり、図4に示すように、試験土壌を作製する内筒と内筒を支持するロードセルを設置した外枠から成り、ロードセルで計測される重量変化を地盤の水収支とみなせる。ここでは、まさ土とマルチング材料から成る地盤構造を模擬し、同気象条件下での蒸発量の比較を行った。図5に、計測システムの概要を示す。比較試験は、3ケース設定した。ひとつは、マルチングの形態についての検討を行うためのものである。図6にCase1の地盤構成模式図を示す。まさ土だけで構成されたLysi-1、マルチングを施したLysi-2、さらにまさ土を上層に設けた改良型マルチング地盤のLysi-3で蒸発量の比較を行う。まさ土の部分はすべて含水比調整をして乾燥密度 1.6 g/cm^3 まで締固めており、初期の飽和度が60%になるようにしている。マルチング材料部分は、粒子破碎が生じないように軽く（Red試料で乾燥密度 0.98 g/cm^3 、White試料では乾燥密度 1.45 g/cm^3 ）締固め、同様に飽和度60%になるようにした。もう一ケースでは、マルチング層厚とマルチング材料の保水性についての検討を行うために、Case1とは異なる層厚で2種類の材料を用いたマルチング地盤を作った（図7）。さらに、Case2と同じ地盤構成で環境変動の影響を除くために、気温を $28 \sim 30^\circ\text{C}$ 、湿度は20%ほどに保たれた恒温室で実験を行った（Case3）。Case2、3とも試料の締固め条件はCase1と同じである。



写真2 ミニスケール試験の様子

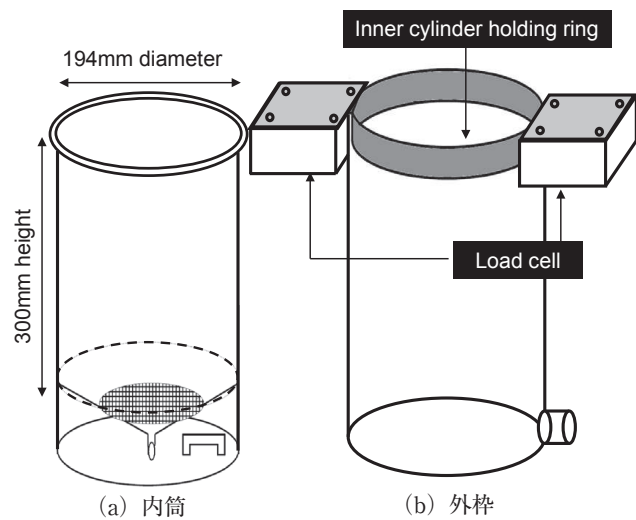


図4 ライシメーターの概要

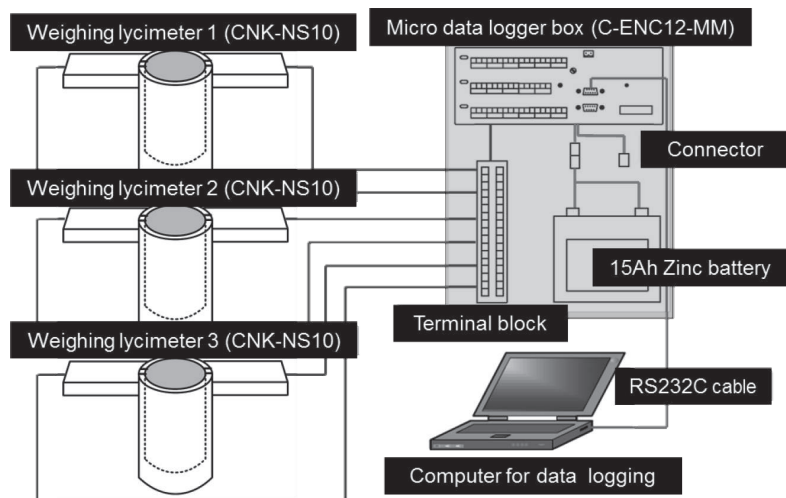


図5 蒸発量計測システム

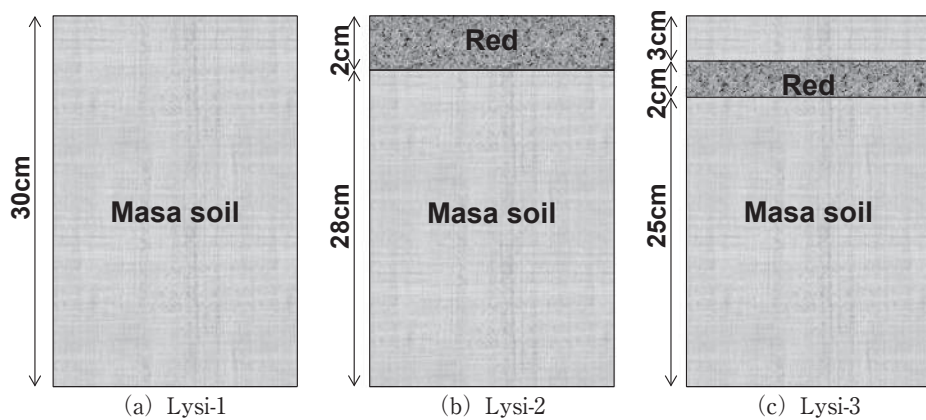


図6 各ライシメーターの地盤構成 (Case1)

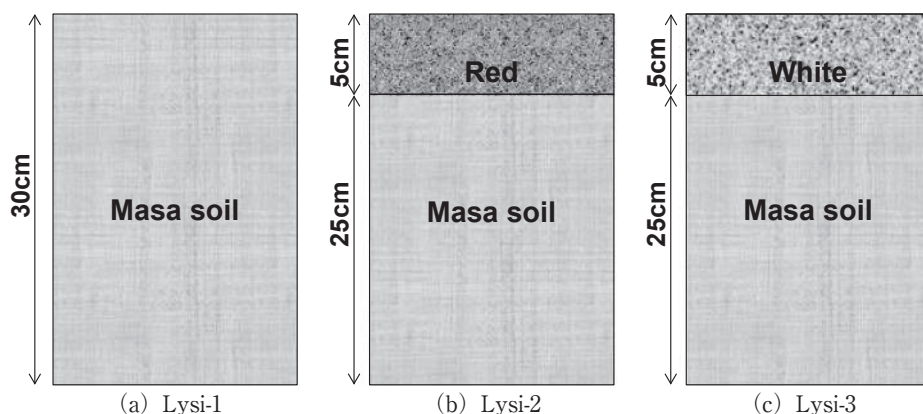
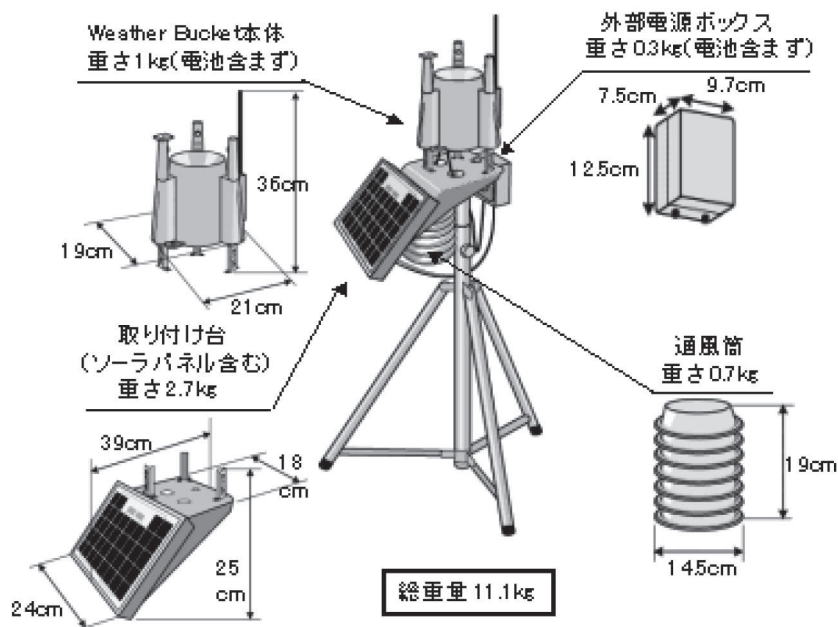


図7 各ライシメーターの地盤構成 (Case2)

図8 ウェザーバケット概要⁴⁾

蒸発量に影響を及ぼす気象条件は、アグリウェザー社製のウェザーバケット (図8) により得た。ウェザーバケットは湿度、気温、降水量、日射量、気圧、風速、風向を同時に計測することができるものである。

3. 試験結果および考察

3.1 ミニスケール試験結果

ミニスケール試験で得られた結果を要因ごとに整理し

て以下に示す。

3.1.1 初期土壌水分量の異なる地盤の実蒸発量

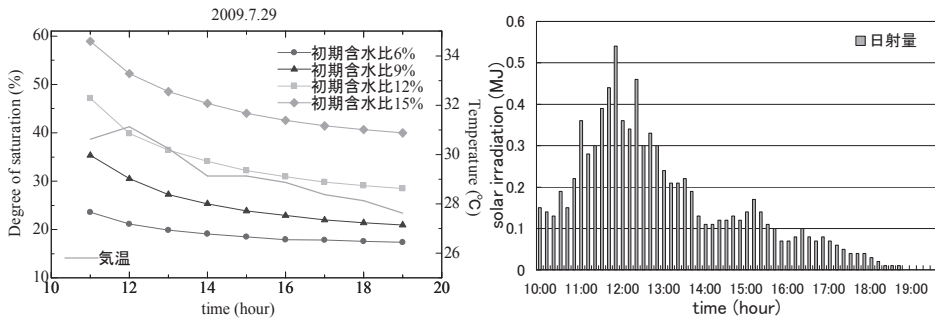
乾燥密度が等しく (1.6 g/cm^3)、初期含水比の異なる層厚一定のまさ土ミニスケール地盤を作り、土壌水分量の蒸発量への影響を調べた。初期含水比は6%、9%、12%、15%を設定し、気象条件の影響も考慮に入れて7月の晴天日である3日で試験を行った。表1に実験条件を示す。

表1 土壌水分量の異なる地盤の初期条件

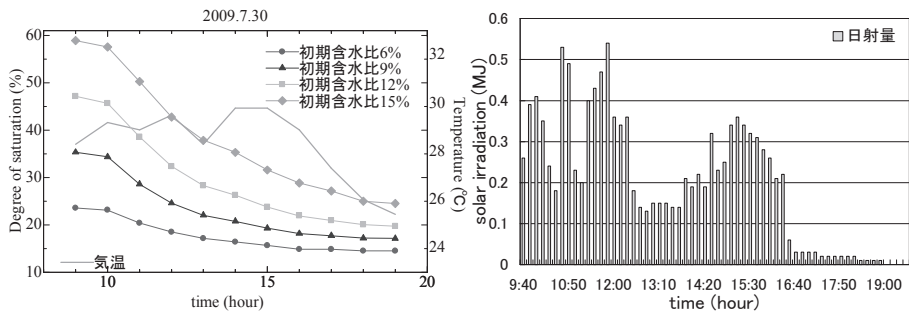
初期含水比	6%	9%	12%	15%
初期飽和度	24%	35%	47%	59%
乾燥密度	1.6g/cm ³			
間隙比	0.683			

図9に飽和度の時間変化と計測時の気温、測定中の日射量の10分積算値を示す。図からわかるように、初期飽和度が高い試料ほど飽和度の減少率が大きく、蒸発量が

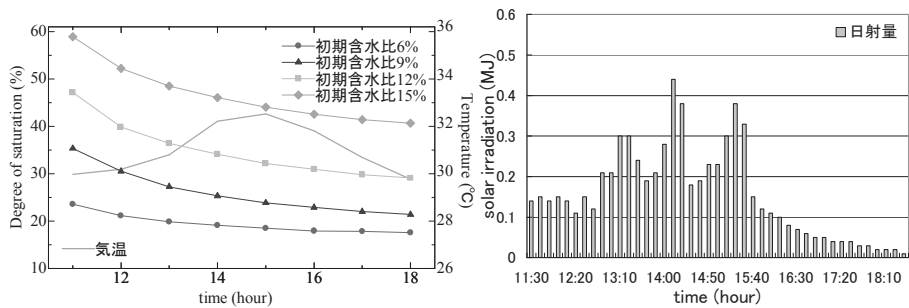
大きい。どの試験日も同様の試料で測定を行っているが、気象条件によって蒸発量が大きく変化することがよくわかる。試験日1、試験日3と比較すると、試験日2は明



(a) 試験日1



(b) 試験日2



(c) 試験日3

図9 土壌水分の異なる地盤の蒸発による飽和度変化と日射量

らかに飽和度の減少量が大きい。表2に示すように、測定中の平均気温は試験日3が最も高く、試験日2は最も低い。一方、測定中の積算日射量は試験日2が最も大きく、試験日3が最も小さい。これらの測定日で大気湿度にはほとんど差がなく、日射量の大小が蒸発散量に与える影響が実験結果の差となって表れている。これは、実験槽内温度の影響によるものと考えられる。ここでは、実験槽内の試料の温度測定は行っていないが、試料は日射量に比例して高くなると考えられ、地盤からの蒸発量に直接影響を及ぼすのは地温変化であると推測できる。

3.1.2 乾燥密度の異なる地盤の蒸発量

次に、飽和度が一定（60%）になる様に同じ層厚に締め固めたミニスケール地盤を作製した。アクリル容器への充填する試料の量を調整することで、乾燥密度をそれぞれ 1.3 g/cm^3 、 1.4 g/cm^3 、 1.5 g/cm^3 、 1.6 g/cm^3 に調整した。これによって、土粒子の詰まり方が蒸発量にどのような影響が及ぶのかを調べた。表3にそれぞれのミニスケール地盤の実験条件を示す。

表2 土壌水分の異なる地盤の蒸発量計測日の平均気温と日射量

	試験日1	試験日2	試験日3
平均気温 (°C)	29.5	28.4	31.1
積算日射量 (MJ)	8.88	11.95	6.74

表3 乾燥密度の異なる地盤の初期条件

初期含水比	60%			
乾燥密度	1.3 g/cm^3	1.4 g/cm^3	1.5 g/cm^3	1.6 g/cm^3
間隙比	1.072	0.924	0.795	0.683

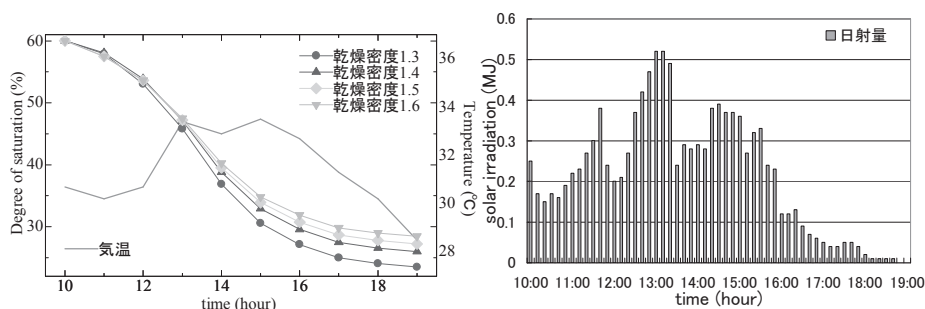


図10 乾燥密度の異なる地盤の蒸発による飽和度変化と日射量

図10に実験結果を示す。実験結果から、乾燥密度が大きい試料ほど飽和度の低減率が小さくなっている。これは、乾燥密度の高い地盤では空隙が小さく保水性が高くなるため⁵⁾、蒸発に伴う飽和度低下によってサクションが増大しやすいからであると説明できる。

3.1.3 層厚の異なる地盤の蒸発量

最後に、層厚を変化させることによる蒸発散量にどのように影響するかを調べた。実験に際しては飽和度一定（60%）の試料を、それぞれ層厚が20mm、30mm、40mmで、乾燥密度一定（ 1.6 g/cm^3 ）となるようにアクリル容器に充填したミニスケール地盤を用いて行った。表4に実験条件を示す。

図11に蒸発量と飽和度の時間変化を示す。図から、層厚が大きくなるにつれて、蒸発量も大きくなっている。これは、飽和度や乾燥密度といった条件が同様の地盤なら、層厚が大きい方が含んでいる水の絶対量が大きいため、蒸発散が促進されやすいためだと考えられる。しかしながら、飽和度の低下量は層厚の小さい方が大きくな

表4 層厚の異なる地盤の初期条件

初期含水比	60%		
乾燥密度	1.6g/cm ³		
間隙比	0.683		
層厚	20mm	30mm	40mm

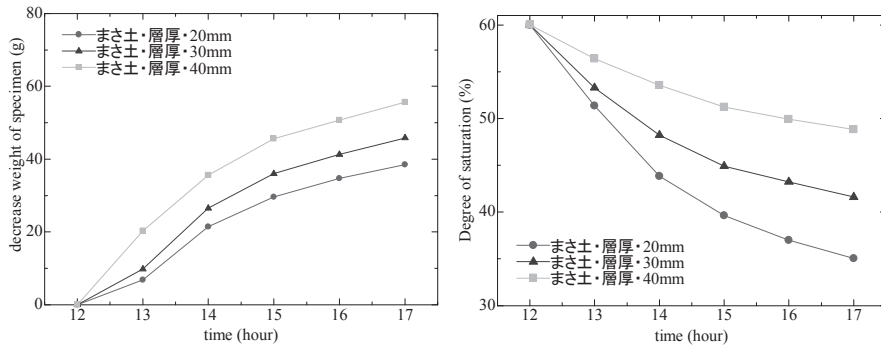


図11 層厚の異なる地盤の蒸発量と飽和度変化

っている。ここでの飽和度は地盤全体の平均飽和土であり、層厚に関係なく一様に蒸発量があるのであれば飽和度変化は等しくなるはずである。ここでの差異は、飽和度低下量に深度方向の分布があることを示しており、地表面近傍で飽和度の低下が大きくなることを意味している。

3. 1. 4 可能蒸発量と実蒸発量の関係

ここで計測された蒸発量は、計測日によって気象条件が異なることから、相互比較を行うことができない。そのため、Penman法を仲立ちに土壌水分量が実蒸発量に及ぼす影響を検討する。Penman法は湿潤（飽和）地盤からの1日当たりの蒸発量（可能蒸発量）を、日射量、気温、湿度から求める方法であるが、本来広大な土地の平均値を算出するものであり、ここで示すような局所的な地盤の蒸発量予測には不適である。そのため、ミニスケール試験で飽和地盤を作製し、可能蒸発量を計測、Penman式と比較することで、Penman式から得られる値を1.7倍することでミニスケール地盤の可能蒸発量に近い値となることを明らかにした（図12）。この手法を用いて、3. 1. 1の試験結果から可能蒸発量と実蒸発量の比を土壌水分量毎にまとめたものが、図13である。飽和度の低下とともに加速度的に実蒸発量が小さくなるが見て取れる。

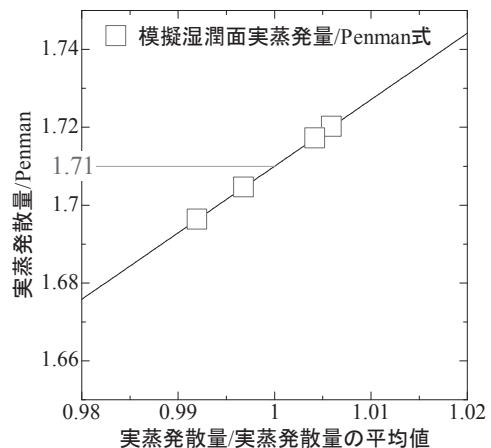


図12 可能蒸発散量と実蒸発散量の比較

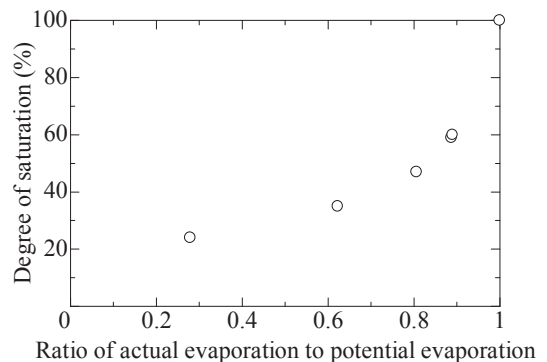


図13 土壌水分量と実蒸発量の関係

3.2 ライシメーター試験結果

ライシメーター試験で得られた結果をCase毎に示す。

3.2.1 Case1

蒸発量の計測は10月中旬から2週間ほど行った。計測期間中に2日ほど降雨があった。図14にライシメーターの重量の時間的推移と降雨を示す。実験開始直後は蒸発量に明確な差は現れていないことが見てとれる。しかし、測定開始から4,000分が経過するころに降水があり、地盤に水分が供給された後に、徐々に差が現れ始め、Lysi-2のマルチングを施した地盤からの蒸発散量が低減されていることがわかる。これは、まさ土とRed試料の保水特性の違いによる。図3から明らかなように、Red試料はまさ土に比べて、低サクション域で大きな飽和度

低下が生じる。地盤材料の透水係数はその飽和度に大きく依存するため、まさ土とRedの境界面で、大きな透水係数のギャップが生じ、その結果上向きの流れが阻害され、蒸発量の違いとなって表れたと考えられる。一方、改良型マルチングを施したLysi-3では、地表面蒸発量の目立った低減は見られなかった。これについては、Red試料の層がまさ土の層にサンドイッチされているため、通常型マルチングと比較してRed試料層の飽和度低下が小さく、両者の飽和度の差、透水係数の差が生じにくかったためと考えられる。また、測定開始後13,000分近傍で比較的大きな降水が観測されている。この時、Lysi-2が他のライシメーターと比較して際立って大きな重量増加が見られた。Lysi-2の表層は他のライシメーターとは

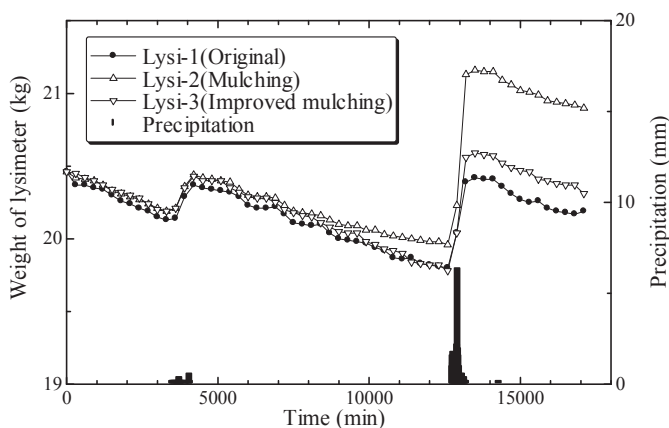


図14 蒸発量計測 (Case1)

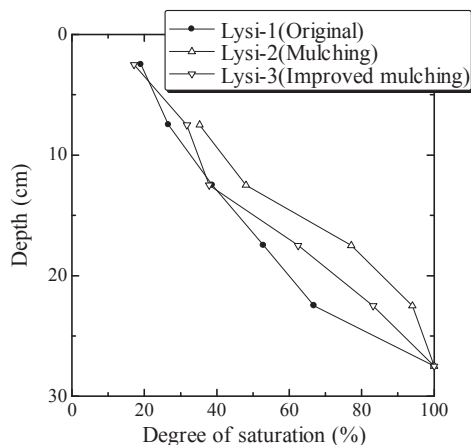


図15 実験終了時の飽和度深度分布 (Case1)

違いRed試料であることが大きく影響していると考えられる。Red試料層はまさ土と比較してかなり間隙比が大きい。したがって、降雨時に雨水が地盤に浸入し易く、間隙にとどめておける水の絶対量も大きい。降雨時により多くの水を地盤内に浸入させることができれば、その分だけ地盤内における下向きの流れが顕著になる。すなわち、Red試料を用いたマルチング地盤では、蒸発量の低減と降雨浸透の促進という2つの効果が期待できる。

測定終了後には地盤の深さごとの飽和度を知るために、ライシメーターに充填したまさ土を、深さ5cm毎に、直径60mm、高さ20mmの円柱形の試料として切り出し、飽和度を計測した。図15に得られた飽和度の深度分布を

示す。マルチングを施した Lysi-2の飽和度は、Lysi-1、Lysi-3の飽和度と比較して、どの深さでも大きい値をとっている。このことから、Lysi-2で行ったマルチングの効果がうかがえる。また、改良型マルチングを施したLysi-3では、地表面近くの飽和度はLysi-1と同じになるものの、深部ほど飽和度低下が抑制されているのが分かる。つまり、図14に現れている蒸発による土槽の重量低下は、地表面近傍の水分消失であると考えられ、改良型マルチング層以深の蒸発による上向き浸透流は原地盤よりも小さいことが予想され、塩害抑制効果が期待できると考えられる。

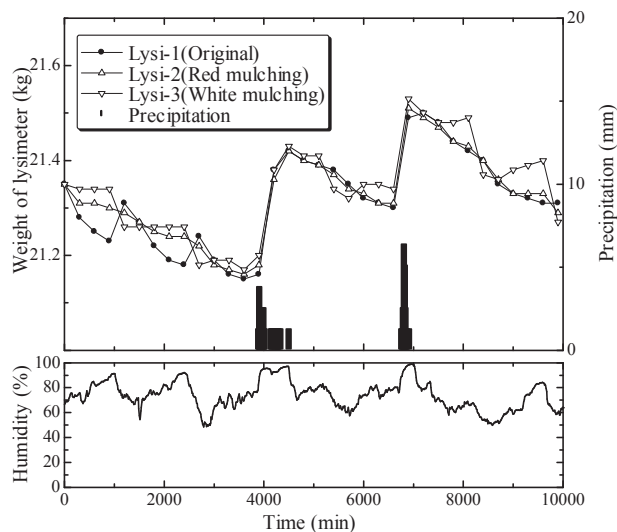


図16 蒸発量計測 (Case2)

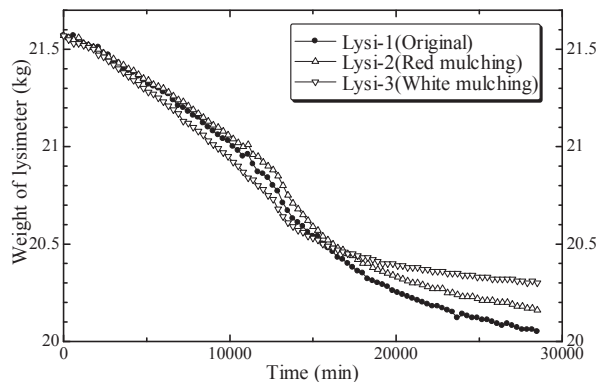


図17 蒸発量計測 (Case3)

3. 2. 2 Case2

図16に、Case 2のライシメーターによる計測結果を示す。12月初旬に設置し、1週間ほど放置した際の重量変化を示している。実験開始直後からLysi-1、Lysi-2、Lysi-3の蒸発散量の間に明確な差が生じていることがわかる。Lysi-2とLysi-3の違いはマルチング材料の違いであり、White試料の方が、蒸発量抑制効果が高いと考えられる。Lysi-1のプロットに着目すると、降雨が無い状況で周期的な重量の増加が見られた。このような現象が見られたのは、日の出前の最も気温が下がる時間帯であり、Lysi-1の重量が増加する時間帯に、Lysi-2、Lysi-3ではむしろ重量が減少しており、単純な蒸発量変化と考えづらい挙動が観察されている。これは、図16に併せて示す湿度変化から説明できる。Lysi-1では、湿度上昇から少し時間遅れを伴って重量が増加している。湿度が増加するとライシメーターの内筒で結露が生じ、結露によって外周についた水蒸気をライシメーターの重量増という形で計測していたことが後で分かった。Lysi-2、Lysi-3ではその影響がさほど現れなかったのは、ライシメーターの設置状況の差である。

3. 2. 3 Case3

Case 2で結露の影響が出たため、同じ地盤条件において恒温室内で蒸発量を計測したCase 3の結果を図17に示す。Case 2の初期に見られたようにWhite試料によるマルチング地盤で蒸発量が最小となった。10日間の蒸発量の差を1年間に換算すると、320mmとなり降水量が少ない地域の年間降水量にも匹敵することが分かった。

4. まとめ

本研究では、地盤材料の保水特性に注目し、地盤からの蒸発量をミニスケール試験により詳細に調査するとともに、ライシメーターを用いてマルチング地盤の有効性について検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- ・実蒸発量は地盤の含水状態に大きく依存し、含水率の低下とともに急激に蒸発量も低下する。そのため、地

表面近傍では、蒸発による含水率低下が顕著となることで、深部からの蒸発量が抑制されることが予想される。

- ・地表面近傍に保水性の低い材料を配すると、容易に地表面近傍の含水率が低下するため、地盤全体からの水消失抑制につながる。これが、マルチングのメカニズムであると説明できた。
- ・改良型マルチングでは、マルチング層の上層での蒸発量が顕著となるものの、マルチング層以深での鉛直上向きの流れを抑制できることが示された。
- ・マルチングにより地盤からの水消失を小さくすることができ、地表面への水分移動とともに水に溶解している塩類の集積抑制につながると考えられる。

ここでは、破碎焼成煉瓦をマルチング材料として用いたが、今後、礫材の粒度分布や土粒子密度などの材料の物理化学特性がマルチングの効果に与える影響について検討を行う必要があると考える。

参考文献

- 1) Penman, H. L.: Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass, Proc. Roy. Soc. London, A193, pp.120-146, 1948.
- 2) Priestley, C. H. B. and R. J. Taylor: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters, Mon. Weather Rev., Vol.100, pp.81-92, 1972.
- 3) 河井克之, 野村瞬, 大野進太郎, Thirapong Pipatpongsa, 橘伸也, 金澤伸一, 飯塚敦: 耐塩害性地盤構造及び塩害地盤浄化手法の検討, 応用力学論文集, Vol.12, pp.421-428, 2009.
- 4) <http://www.agw.jp/bucket/about/outside.html>
- 5) 河井克之, 軽部大蔵, 芦田渉, 嘉戸善胤: 間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル, 土木学会論文集, No.666/Ⅲ-53, pp.291-302, 2000.