

吸水性ポリマーが含水土壌からの水分蒸発に及ぼす影響

The Effect of Water Absorbent Polymer on Vaporization from Water - Saturated Soil

笹口 健吾^{*1}
Kengo SASAGUCHI石原 修^{*1}
Osamu ISHIHARA酒井 孝司^{*1}
Kouji SAKAI吉本 正彦^{*2}
Masahiko YOSHIMOTO野副 哲司^{*3}
Tetsushi NOZOE

Abstract

The mixing of a small amount of water absorbent polymer(WAP) particles with soil may have potential for maintaining the thermal conductivity and the heat capacity of soil relatively high for a long period because the WAP can absorb a large amount of water and retain it. Experiments using a laboratory - scale test cell have been conducted to confirm the effect of WAP on reduction in the vaporization of water from soil. Water - saturated glass beads have been used as a model for the soil. The ambient temperature and relative humidity, the size of the glass beads and the way of mixing WAP into the soil have been changed. The WAP has a great effect on reduction in the vaporization of water even for the soil with the small - size glass beads. When the WAP was mixed into only near the surface of the soil, a larger ratio of the mass of WAP to the initial mass of water contained in the soil was needed, compared with the soil uniformly mixed with the WAP in the entire body. The mechanism of the water vaporization has been revealed.

Key Words : Soil thermal energy storage, Water absorbent polymer, Experiments

1. まえがき

最近、エネルギーの有効利用の観点から、土壌蓄熱に関して種々の研究が行われている(例えば文献(1)及び(2))。土壌は元来、それを構成する粒子の熱容量や熱伝導率が小さいため、土壌の蓄熱特性を向上させるためには、大きい熱容量及び熱伝導率を有する水分が土壌表面から蒸発するのを極力抑えることが重要である。そこで、非常に高い吸水及び保水性を有することで知られている高分子吸収性樹脂(吸水性ポリマー)⁽³⁾を土壌に含有させて、土壌内の含水率を高いレベルで安定に維持できるならば、蓄熱特性のかんりの向上が期待できると思われる⁽⁴⁾。

吸水性ポリマーの保水特性に関しては、メーカーが提出している簡単なデータ及び土壌に対しての応用に関する報告⁽⁵⁾があるが、雰囲気状態、土壌粒子径あるいは吸水性ポリマーの土壌への混入方法が土壌表面からの水分蒸発に及ぼす影響を系統的に調べた例はない。そこで、本研究では、実験室規模のテスト容器を用いて実験を行ない、上述した種々の要素が土壌からの水分蒸発に及ぼす影響を詳細に調べた。また、ポリマーを含まない場合の実験も同時に行ない、ポリマーを含む場合との比較検討を行なった。

2. 実験装置と方法

実験装置の全体構成及びテスト容器を図1及び図2に示す。テスト容器は厚さ8mmのアクリル板で作られており、その内面の高さは120mmで、横幅及び奥行きはいずれも84mmである。土壌は、密度、比熱及び熱伝導率が比較的近いこと及び粒子径が揃ったものを入しやすさなどを考慮して、ガラスビーズで模擬した。また、大きい水分蒸発が生じる含水土壌の代表として、含水砂層があげられるので、本研究では比較的大きい粒子を選ぶとともに、その中で粒子径の影響を見るために、平均粒子径 $d = 0.12\text{mm}$ 及び 1mm の粒径のガラスビーズを用意した。また、吸水性ポリマーとしては、平均粒径 0.25mm の住友化学製S-50を使用した。なお、図2には土壌内の熱電対(銅-コンスタンタン)の位置も示している。

実験は次の三つのポリマー混入条件で行った。

①ポリマーを全く混入しない場合(ポリマー無)：テスト容器の底部から100mmの高さまで土壌を入れ、次に純水を飽和状態になるまで注入する。

②ポリマーを土壌全体に均一に混入する場合(ポリマー均一含有)：ポリマー無と同一の重量・初期水分量の土壌に、初期水分量に対して2%の重量のポリマー(この程度の量で十分効果的であることが既に明らかである⁽⁶⁾)を混入し、別容器で十分混ぜ合わせた後、テスト容器に入れた。なお、ポリマーは吸水すると膨張するため、120mmの高さのテスト容器に入りきれなかった分の土壌は除外した。

*1 会員 熊本大学工学部(〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

*2 会員 九州電力(株)(〒810-8720 福岡市渡辺通2-1-82)

*3 非会員 熊本大学工学部(〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)
(原稿受付：平成11年1月13日)

Faculty of Engineering, Kumamoto University
Kyushu Electric Power Company Inc.
Faculty of Engineering, Kumamoto University

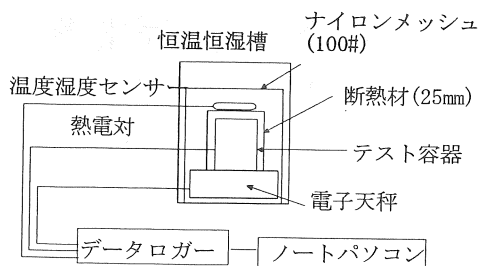


図1 実験装置の全体

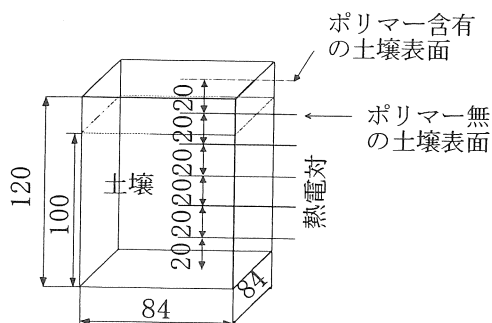


図2 テスト容器

③ポリマーを土壌表面付近のみに混入させる場合(ポリマー不均一含有): まず, テスト容器に高さ 100mm の飽和土壌を準備する。次に, 別容器で適当な量の飽和土壌を作り, その水分重量に対して 2%あるいは 5%の重量のポリマーを十分混ぜ合わせる。そして, このポリマーを含有した土壌を, 準備されているテスト容器内の飽和土壌の上に高さ 20mm だけ入れる。

全てのポリマー混入条件に対して, 容器は上面を除く全ての面を厚さ 25mm の発泡スチロール断熱材で覆った後, 上蓋を閉じた状態で, 所定の雰囲気温度 T_a 及び相対湿度 ϕ に設定された恒温恒湿槽内の精度 0.01g の電子天秤上に置かれた。また, テスト容器は雰囲気の気流の影響を防ぐために, 100 # (# : 1 インチ当たりの孔数) のナイロンメッシュ布で囲った。土壌内が一様な初期温度 T_i (雰囲気温度 T_a と等しい)になったのを確認した後, 上蓋を取り外し, 実験を開始した。所定の時間間隔(30min.)で測定された温度及びテスト容器重量(この時間変化から水分蒸発量を算出)はデータロガーを経てノートパソコンに取り込まれ 10 日間にわたって記録された。実験は雰囲気温度 T_a 及び雰囲気相対湿度 ϕ を変化させて行い, これらのパラメーターが水分蒸発速度及び土壌内温度の時間変化に及ぼす影響を詳細に調べた。

表1 ポリマー均一含有及びポリマー無の場合の実験条件及び結果

 (a) 粒子径が大きい場合($d=1.0\text{mm}$)

Run	Per. [day]	T_i [°C]	T_a [°C]	ϕ [%]	W_w [g]	W_g [g]	W_p [g]	W_{ev} [g]
Run1	10	30	30	65	281.2	1060.3	5.62	62.5
				80			0	162.4
Run2		40	40	65			5.62	46.4
				80			0	94.7
Run3	10	30	30	65	281.2	1060.3	5.62	74.5
				80			0	212.3
Run4	10	40	40	65	281.2	1060.3	5.62	96.4
				80			0	221.8

 (b) 粒子径が小さい場合($d=0.12\text{mm}$)

Run	Per. [day]	T_i [°C]	T_a [°C]	ϕ [%]	W_w [g]	W_g [g]	W_p [g]	W_{ev} [g]
Run1'	10	30	30	65	265	938.9	5.3	71.3
				80	300	1062.9	0	187.5
Run2'		40	40	65	265	938.9	5.3	53.2
				80	300	1062.9	0	132.1
Run3'	10	30	30	65	265	938.9	5.3	104.3
				80	300	1062.9	0	243.9
Run4'	10	40	40	65	265	938.9	5.3	115.3
				80	300	1062.9	0	295.4

3. 結果と考察

3.1 吸水性ポリマーを土壌に均一に混入した場合の効果

表1にポリマーを均一に含有させた場合とポリマーを全く含有させない場合の実験条件及び10日間の積算水分蒸発量 W_{ev} の測定結果を示した(1つのRunにポリマーを混入した場合としない場合($W_p=0\text{g}$)の2つの結果が書かれてあることに注意)。なお, 土壌粒子径が小さい場合の初期水分量 W_w 及び土壌重量 W_g がポリマーを混入した場合としない場合でわずかに異なるのは, 前述したように, ポリマーを混入した場合土壌体積が増加するため, テスト容器に入りきらない分を排除したからである。全ての条件に対して, ポリマー均一含有の場合の10日間の水分蒸発量(表1の W_{ev})がポリマー無の場合のそれの1/2~1/3程度であることから, ポリマーの土壌への混入は, 土壌粒子の大きさにかかわらず, 水分蒸発抑制にかなり効果的であることが分る。

土壌への均一なポリマー混入の影響を詳細に見るため, 土壌内温度の時間変化の一例を図3に示す。まず, 図3(a)の土壌粒子径が大きい場合(Run4)を見ると, ポリマー無の場合(太線), 初期では土壌表面近傍($y=1\text{mm}$)の温度の急激な低下が見られ, しばらくの時間, この温度は低いままに保たれる。また, 土壌内の温度も, 低下の程度は少ないが, 下降していることが分かる。これは, 水分の急激な蒸発による吸熱作用のためである。時間が更に経過すると, 土壌の温度は徐々に

上昇し、雰囲気温度に近づいていく。一方、ポリマー均一含有の場合では(細線)、初期における土壌温度の低下は全体的

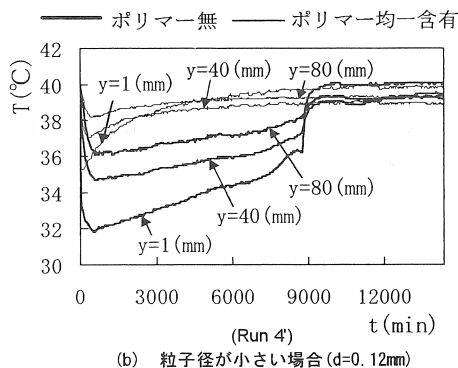
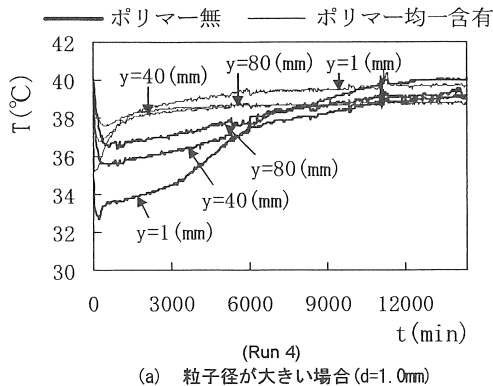


図3 土壌内温度の時間変化

に小さく、ポリマーの保水作用で、全時間にわたって、水分蒸発が抑制されているのが明らかである。

土壌粒子径が小さい場合(図3(b);Run4')も同様な傾向が見られるが、ポリマー無の場合では、土壌内温度が低下した状態が、粒子が大きい図3(a)と比較して、長時間続いており、その後温度は雰囲気温度まで急増していることが異なる点である。一方、ポリマー均一含有の場合では、極初期において土壌表面近傍の温度低下が、粒子径が大きい場合に比べて僅かに大きいことを除けば、粒子径の相違による影響は極めて小さいと言える。

次に、全実験に対する蒸発速度 $\dot{m}$ の時間変化をまとめて図4に示す。なお、 $\dot{m}$ は次式で定義した。

$$\dot{m} = \Delta W / (\Delta t \cdot A) \quad (\text{kg/m}^2\text{h})$$

ここで、 ΔW : Δt 時間での水分蒸発量、 Δt : サンプルング間隔、 A : 土壌表面積である。図4(b)右図のRun4'の $\dot{m}$ と図3(b)の太線を比較すると、土壌の温度が低下している期間は蒸発が活発な期間に対応し、土壌温度の急激な上昇は $\dot{m}$ の急激な減少に対応していることが良く分かる。また、粒子の大小にかかわらず、全実験条件において、土壌へのポリマーの均一な混入が蒸発を良く抑制していることが明確に分かる。更に、表1の実験条件と共に図4を見ると、雰囲気相対湿度 ϕ が小さい程(例えばRun1とRun2を比較)、また、雰囲気温度が高い程(例えばRun3とRun1を比較) $\dot{m}$ は大きいことも分かる。

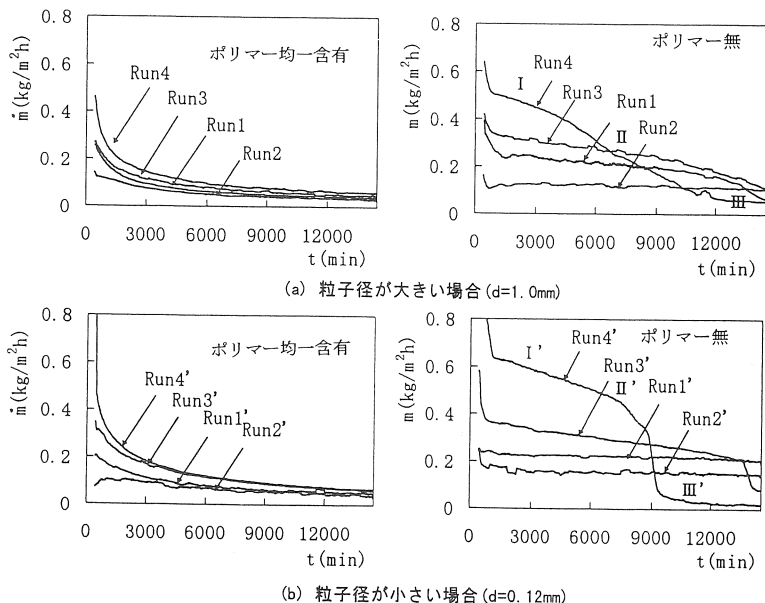


図4 蒸発速度の時間変化

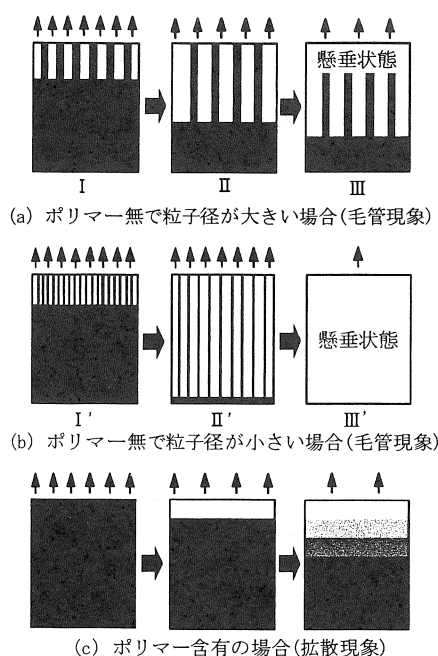


図5 水分移動・蒸発モデル

3.2 蒸発機構

以上の実験結果に基づいて、土壌内の水分移動・蒸発モデルを図5のように構築した。まず、ポリマー無で土壌粒子径が大きい場合(図5(a))、初期では(図5(a)のI)、水で飽和した部分(黒く塗り潰した部分)の表面は土壌表面に近く、また毛管力が水を活発に土壌表面まで吸い上げるため、 $\dot{m}$ は大きい(例えば図4(a)右図のRun4のIの部分)。その後、徐々に飽和水面は低下するため(図5(a)のII)、土壌表面への水分供給量が減少し、結果的に土壌表面での水分蒸発が徐々に減少していく(図4(a)右図のRun4のIIの部分)。更に時間が経過すると、毛管高さ以上に飽和水面が下がり(試算の結果、粒子径が大きい場合の毛管高さは容器の高さより小さいことを確認している(付録参照))、図5(a)のIIIに示すように、水は直接には土壌水面まで吸い上げられなくなる。従って、この段階では、 $\dot{m}$ はかなり小さくなる(図4(a)右図のRun4のIIIの部分)。

次に、ポリマー無で土壌粒子径が小さい場合は、試算(付録参照)から毛管高さが容器高さより大きいため、図5(b)のII'に示したように、飽和水の部分が消滅するまで、土壌表面への水分供給は続き、図4(b)右図のRun4のI'及びII'部分のように、 $\dot{m}$ が大きい期間が長く続き、飽和水が無くなると(図5(b)III')、 $\dot{m}$ は急激に減少することになる(図4(b)右図のRun4のIII'の部分)に対応。

一方、ポリマー均一含有の場合では(図5(c))、水分を

 表2 ポリマー不均一含有の場合の実験条件及び結果($d=0.12\text{mm}$)

Run	Per. [day]	T_i [°C]	T_a [°C]	Φ [%]	W_w [g]	W_g [g]	W_p [g]	W_{ev} [g]
Run5	10	40	40	50	338.8	1200.6	0.78(2%)	245.5
Run6					334.5	1185.3	1.73(5%)	147.7

含んで膨張したポリマーが土壌粒子間の間隙を塞いでしまうため、毛管力は作用せず、水分移動は土壌内の水分濃度差による拡散現象に支配されると考えられる。また、ポリマーの高保水性により、この拡散速度はかなり小さくなる。従って、図4(a)及び図4(b)の左の図に見られるように、ポリマー含有の場合は、粒子径の大きさによらず、 $\dot{m}$ は時間と共に単調に減少するという非定常拡散現象に特徴的な変化をしており、かつ $\dot{m}$ の値は、ポリマー無しの場合と比べて、かなり小さくなっている。

3.3 吸水性ポリマーを土壌表面付近のみに混入した場合の効果

次に表2は、小さい土壌粒子に対して、ポリマーを土壌表面のみに含有させた場合の結果で、ポリマー2%及び5%含有の場合をそれぞれRun5及びRun6とした。表2と雰囲気温度及び湿度が等しい表1(b)のRun4のポリマー均一含有の場合(上段)において、水分蒸発量 W_{ev} の値を比較すると、Run4の $W_{ev}=115.3\text{g}$ に対してRun5では $W_{ev}=245.5\text{g}$ であり、2%のポリマー不均一含有は均一含有の場合に比べて、水分蒸発抑制効果は不十分である。しかし、Run6では $W_{ev}=147.7\text{g}$ となっており、混入ポリマー重量 W_p がRun4と比較してかなり小さいにもかかわらず、5%のポリマー不均一含有は水分蒸発抑制にかなりの効果があると言える。従って、経済性及び施工性を優先させる場合には、この程度の比率のポリマーを土壌表面付近のみに含有させる手段が有効であると考えられる。

図6及び図7にそれぞれ蒸発速度 $\dot{m}$ 及び水分残存率 R_w の時間変化の比較を示した。これらの図からも明らかのように、5%のポリマー不均一含有は水分蒸発をかなり良く抑制しているが、2%のポリマー不均一含有では不十分な効果しか得られない。ポリマーを土壌表面付近のみに含有させた場合、吸水していた土壌表面付近のポリマーは時間と共に徐々に水分を放出するが、ポリマー層の下部の水分をすぐに吸収すると思われる。従って、ポリマー不均一含有の場合の土壌表面付近は、ポリマーを土壌全体に均一に含有させた場合と比較して、常に水分が多い状態に保たれ、水分蒸発も多くなる。従って、2%程度のポリマー不均一含有では、ポリマー均一含有に比較して、水分蒸発抑制効果が大きくないと思われる。

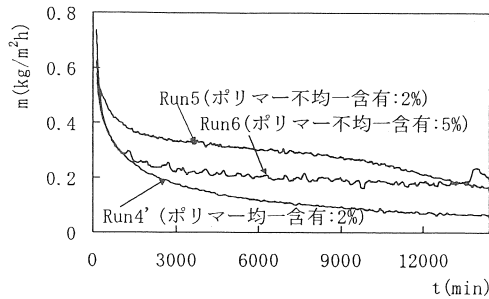


図6 ポリマー均一含有と不均一含有の場合の蒸発速度の時間変化

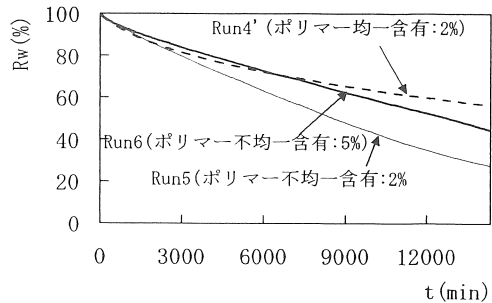


図7 ポリマー均一含有と不均一含有の場合の水分残存率の比較

4. まとめ

吸水性ポリマーを土壌に混入させない場合は、土壌粒子径が小さいと、土壌表面からの水分蒸発はかなり大きくなる。しかし、初期水分重量に対して2%の吸水性ポリマーを土壌全体へ均一に混入すると、土壌粒子径の大きさにかかわらず、土壌表面からの水分蒸発抑制に大きな効果がある。また、土壌表面付近のみにポリマーを混入させる場合は、ポリマー混入比率を少し大きくしないと効果が小さい。土壌内温度の時間変化などの実験結果に基づいて、土壌内の水分移動及び土壌表面からの水分蒸発を説明するモデルを構築した。

記号

T_i : 初期温度[°C]
 T_a : 雰囲気温度[°C]
 ϕ : 雰囲気相対湿度[%]
 d : 土壌平均粒子径[mm]
 W_w : 初期土壌水分量[g]
 W_g : 土壌重量[g]
 W_p : ポリマー量[g]
 W_{ev} : 水分蒸発量[g]
 H : 土壌高さ[mm]
 $\dot{m}$: 蒸発速度[kg/(m²h)]
 Per : 実験期間

文献

- (1) 鄭・中原, 他2名, 温室における太陽エネルギー土中蓄熱の最適化に関する研究(1), 太陽エネルギー, 18-6(1992), 42.
- (2) 増田, 高吸水性ポリマー, (1998), 共立出版, 東京.

(3) K. Sasaguchi, O. Ishihara, et al., Development of an Under-Ground Heat Storage System Using Midnight Electric Power(Part 2), *Proc. of 7th Int. Conf. on Thermal Energy Storage*, 2, (1997-6), 659, Sapporo, Japan.

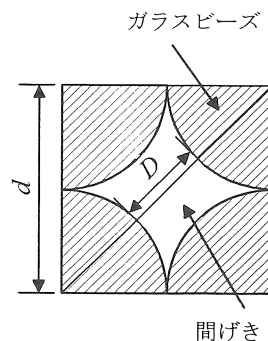
(4) 石原・笹口, 他3名, 高分子吸水性樹脂(ポリマー)の蓄熱材への適用研究, 熊本大学地域共同研究センター第8回技術セミナー概要集, (1996), 15.

(5) 長田・長田, ゲルハンドブック, (1997), 560.

(付 録)

付図1のようにガラスビーズ(土壌粒子のモデル)が単純立方格子状に充填されているとし、代表間隙寸法を付図1の D とすると、最大毛管高さ h は次式のように表すことができる。

$$h = \frac{4\sigma}{\rho g D}$$



付図1 土壌の間隙のモデル

ここに、 σ 、 ρ 及び g はそれぞれ水の表面張力、水の密度及び重力加速度である。本研究で用いたガラスビーズ直径 $d=1.0\text{mm}$ 及び 0.12mm の場合 $D=0.414\text{mm}$ 及び 0.050mm となり、それぞれの d の値に対して、上式を用いて h を求めると（但し、 $\sigma=0.0728\text{N/m}^2$ 、 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 及び $g=9.8\text{m/s}^2$ とした）、 $d=1.0\text{mm}$ 及び 0.12mm のガラスビーズに対して それぞれ $h=72.5\text{mm}$ 及び 600mm となる。従って、本研究では

土壌高さが 100mm （ポリマー無の場合）であることから、 $d=1.0\text{mm}$ のガラスビーズを充填した場合の最大毛管高さは土壌高さより小さく、 $d=0.12\text{mm}$ のガラスビーズの場合は逆に最大毛管高さは土壌高さより大きくなる。従って、 $d=0.12\text{mm}$ のガラスビーズの場合では、水が無くなるまで土壌表面へ毛管力で水を吸い上げることが可能である。