

9419 砂漠緑化・塩類化防止のための塩・水の移動・収支解析に基づく水の効率的利用および太陽熱造水とそのエネルギー評価

助成研究者：小島 紀徳（成蹊大学 工学部）

共同研究者：安部 征雄（筑波大学 農林工学系）

上宮 成之（成蹊大学 工学部）

過去多くの森林が伐採され、農地となりこれが放置され、広義の砂漠となっており、今問題となっている二酸化炭素濃度増加の一因ともなっている。砂漠化の一因として不適切な灌漑など人為的な原因による塩害が主因である。これらの地域では十分な量の塩水（海水を含む）は得られることが多く、これから得られた淡水を用いれば、緑化、塩類化防止も可能であるが、淡水化には膨大なエネルギーを要し、二酸化炭素問題との観点からはむしろ負の対策ということにもなりかねず、水の使用量は極限まで減少させる必要がある。

砂漠土壤中の水と塩の挙動を明らかにするために、一次元の円筒型装置を用い、模擬土壌（ガラスビーズ）に吸水性ポリマー（SAP）を混合する場合と混合しない場合について水と塩の分布を測定した。条件として、純水、塩水（塩濃度:0.5%）の場合、また塩水の場合には予め純水で飽和させた場合について測定した。また、蒸発速度を促進させた場合として、赤外線ランプを照射させた場合についても検討した。併せて上記の層中の塩水と純水の透過速度についても、SAPが有る場合とない場合について測定した。

SAPを含む層の場合には含まない層の場合と比して水分含有量は多かった。これはガラスビーズ中の空隙にあるSAPが膨潤し、空隙を押し広げたためと考えた。SAPを含む層の場合、SAPの膨潤により水の透過が妨げられ、透過速度が低下した。これらのSAPの影響は、純水の場合ばかりではなく塩水の場合にも認められたが、その影響は純水の場合に比して小さかった。赤外線ランプにより蒸発を促進した場合には、表層における塩の蓄積が見られたが、この現象はSAPを混合することにより抑制されることが明らかとなった。以上、SAPの混合により、層中の水と塩の移動が抑制され、その結果、蒸発が抑制され、塩分の蓄積が抑えられたものと考えられる。

実際の乾燥条件下で既に塩害が生じつつある農地あるいは放棄地などを考えた場合の塩類捕集法としてDRY-UP法を提案し、これが必要水量、水質の面から、従来のリーチング法に比して有効であることを示した。

最後に、太陽熱造水により植林用の水を海水から製造する際のエネルギー評価を行い、植林面積の半分程度の造水装置面積が必要であることを示した。

以上、自然エネルギーを用いる効率的造水法の開発と、さらなる節水法の開発が必要であることが確認された。

9419 砂漠緑化・塩類化防止のための塩・水の移動・収支解析に基づく水の効率的利用および太陽熱造水とそのエネルギー評価

助成研究者：小島 紀徳（成蹊大学 工学部）

共同研究者：安部 征雄（筑波大学 農林工学系）

上宮 成之（成蹊大学 工学部）

1. 研究目的

地球温暖化問題特に二酸化炭素問題の主因は化石燃料の使用であり、代替ソフトエネルギー源の開発、使用エネルギー量の削減が最重要課題である。しかし、大気への残留はその半分強の35億t-Cに過ぎず、一方植物圏からの放出はその半分を占める。即ち熱帯林の破壊を止め、従来の破壊速度と同一の速度で植林を進めれば、二酸化炭素問題は一応抑えることができる。さらに歴史的には、二酸化炭素の積算放出量の半分以上が農地化を目的とする森林の伐採によりもたらされた。

この様に作られた農地の多くが放置され、広義の砂漠となっているが、これは不適切な灌漑など人為的な原因による塩害が主因である。これらの地域では十分な量の塩水（海水を含む）は得られることが多く、これから得られた淡水を用いれば、緑化、塩類化防止も可能である。しかしながら、これらの塩水の淡水化には膨大なエネルギーを要し、二酸化炭素問題との観点からはむしろ負の対策ということになる。必然的に太陽エネルギーに頼ることになるとしても、砂漠緑化、植林のための水の使用量は極限まで減少させる必要がある。

そこで本研究においては、まずこれらの地域における塩害・砂漠化の防止、緑化・植林のための給水・節水法の提案を目的とした、土壤中の塩分、水分の移動に関する研究をまず行った。ついでこれを基礎に塩害を地中における水分と塩分の移動現象として捉え、工学的な面から有効な対策の提案を試みた。

塩害防止対策としては、灌漑用水の良質化・灌水量の少量化・地下水位上昇の阻止などがある。一方、塩害発生後の処理対策(除塩対策)としては、主にリーチングが用いられる。しかし、リーチングは、良質の(低塩濃度の)水を大量に要し、また地下排水施設を完備しなければならない。良質の水を大量に使用することは乾燥地においては非常に困難である。また、リーチングは過剰灌漑となりやすいので、排水を伴わない場合は、地下水位の上昇を招いてよりさらなる塩害の原因となる。また地下排水施設は高価であるので、用いることができないケースも多い。このようなリーチングの欠点を考えると、より節水・塩水使用型の除塩システムの開発が望まれる。本研究は、水質・水量・排水の3点に注目し、特

に水事情の良くない地域において、リーチングより効率の良い新たな除塩方法の開発をめざしたものである。ここでの目的は、DRY-UP法とリーチングを比較することによって、その有効性を明らかにすることである。

最後に二酸化炭素問題との観点から造水技術に対するエネルギー評価を行った。

2. 研究方法

2. 1 水分分布と塩分分布の測定

実験装置は透明アクリル樹脂製で、内径50 mm、高さ50 mmの円筒の上に内径50 mm、高さ30 mmの円筒を8個重ね合わせたもので、全高290 mmである。模擬土壌として粒径0.4 mmのガラスビーズを用い、ガラスビーズのみの供試体と、保水剤（日本合成化学製AP-100、粒径0.3 mm程度、アクリル酸系）を0.1 wt%混合した供試体を作成した。

実験手順は以下のとおりである。実験はすべて室温25°C、湿度25%の条件下で行った。円筒装置に供試体を高さ270 mmまで自然充填（圧力、振動を加えずに上からビーズを注入）した（空隙率は0.42程度）。装置全体を約12時間、純水に浸し、模擬土壌中の空隙をあらかじめ純水で完全に満たした。装置を一度純水より取り出した後、装置下部のビーズ層が10 mmだけ純水に浸るように再び静置した。同様な実験を純水に代え、0.5wt%塩化ナトリウム水溶液（以下塩水と呼ぶ）を用いて行った。また、純水により空隙を満たした後に、装置下部を塩水に浸す場合についても行った。さらに太陽光による乾燥を想定し、赤外線ランプを使用した条件も採用した。赤外線ランプ(60 v、185 Wh)を模擬土壌表面から90 mm離し、2つの装置に同時に照射した。なお、本条件において、水分を全く含まない模擬土壌の表面温度を測定したところ60°C(±3°C)に保たれていた。

静置後2日、14日、および25日経過したときの、水分分布と塩分分布（塩水を用いた場合）を、高さ30 mmの円筒を1ブロックとして測定した。水分量はサンプルを乾燥（110°Cで15時間）させたときの質量減少量から決定した。さらに乾燥後の供試体に50 mlの純水を加えてろ過し、ろ液の塩分濃度を導電率計（横河電機製SC82）により測定した。

2. 2 流通抵抗実験

後述のように、水分・塩分分布の測定において、ビーズ層の流通抵抗が結果に大きく影響することが示唆されたので、模擬土壌層内の流通抵抗を測定した。12 gのガラスビーズまたはそれに保水剤を0.1%加えた供試体を内径10.5 mmのアクリルパイプに自然充填した。供試体は自然充填で90 mmの高さになり、その上に網状の蓋をした。水柱高さで100 mmの圧力を供試体層にかけたときの水の流出速度を測定した。層高を高くすると体積が増加することにより空隙率（間隙率）が増加する。実験においては蓋を5 mmずつ上げて体積を変化

させた。ここで、みかけの空隙率 ε は、以下で与えた。

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{ビーズ重量} / \text{ビーズ密度}}{\text{層高} \times \text{断面積}} \quad [-]$$

2. 3 DRY-UP法による除塩

具体的な除塩の方法は、土壤表面に通水性のシートを密着させ、そのシート上に土壤内の塩類を集積させた後、シートごと塩類を除去しようとするものである。この方法では、除塩用水は土壤表面に集積している塩類を溶解させた後再び土壤表面に上昇し、シート上で蒸発する。よって、土壤表層の塩類を地下排水組織まで流し去るリーチングに比べて、用水の移動距離が短く、土壤表面に集積している塩類をより少量の水で除去できることが予想された。また、除塩用水に含まれる塩類もシート上で処理されるため、高塩濃度用水の使用も可能であると考えられた。さらに、排水は全く必要がないので、排水組織の完備されていない圃場でも使用することができると思われる。今後、この新除塩法をDRY-UP法と呼ぶことにする。また、この方法は土壤内の難移動水に含まれる塩類を蒸発力で土壤表面まで移動させて処理することにも応用できると考えられる。そこで、各条件下における除塩を2通りの方法で行い、その効率を比較した。

実験供試体として、高さ10cm・半径4.5cmの亚克力性カラムに、豊浦標準砂を最疎充填と最密充填の中間の密度で充填したものをを用いた。カラムの底部は濾紙を挟んで多孔板となっており、排水条件は良好である。環境条件は、温度40℃・湿度50%とし、強い乾燥条件下とした。

実験は、以下の手順で行った。供試体を0.5%のNaCl溶液で浸潤飽和した。ついで供試体の側面を断熱材で断熱し、温度40℃・湿度50%の条件下で96時間乾燥させた。なお、この状態でサンプリングした試料を塩類集積状態とし、実験の開始状態とした。塩類集積状態は、3サンプルの平均値によって求めた。塩類集積状態のサンプルに対し、除塩用水を灌水した。土壤表面に直接灌水したサンプルをリーチング処理サンプルとし、土壤表面にガーゼ5枚の除塩シートを敷いてから同量・同質の用水を灌水したサンプルをDRY-UP処理サンプルとした。各除塩処理サンプルを温度40℃・湿度50%でさらに96時間乾燥させた。供試体を深さ1.25cmごと8層に分割・採土した。サンプリングした各試料を乾燥機で絶乾状態まで乾燥した後、含水比と1:2上澄抽出法による電気伝導度を求め、NaCl量に変換した。除塩処理後のNaCl量を供試体飽和時に含まれているNaCl量で除したものを除塩率とし、除塩効率を表す指標とした。

$$\text{除塩率} = \frac{\text{除塩後の土壤内残留塩量}}{\text{除塩前の土壤含有塩量}} \times 100(\%)$$

2. 4 砂漠における太陽熱造水のエネルギー評価

植生育成に必要な水をすべて太陽熱造水により海水から製造した場合を想定し、その必

要エネルギーと太陽熱造水のエネルギー効率から、必要面積を計算した。

3. 研究結果および考察

3.1 水分分布と塩分分布の測定

得られた水分分布の測定結果例をFigs. 1-3 に、また、塩分分布の測定結果例をFigs. 4-6 に示す。これらの図中で縦軸は、

$$\text{含水比} = \frac{\text{水重量}}{(\text{水重量} + \text{ビーズ重量})} \times 100 \quad [\%]$$

$$\text{塩分濃度} = \frac{\text{塩重量}}{(\text{塩重量} + \text{ビーズ重量})} \times 100 \quad [\%]$$

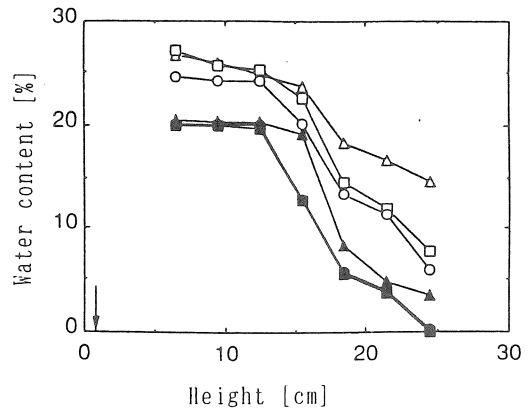
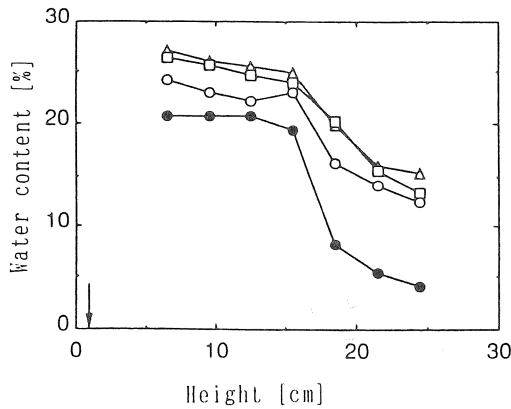
により定義した。また、高さはビーズ層最下部からの高さであり、外部水位は10 mmの高さである。

いずれの場合でも、高さ百数十 mmまで毛細管現象により、供試体層は水で飽和されている。Fig. 1に純水、赤外線ランプ照射なしの条件での保水剤の有無が水分分布に与える影響を示した。ここで矢印は外部水位を示す。

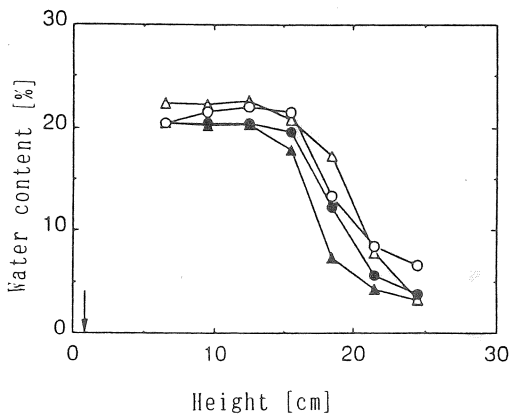
飽和毛管帯までの水分量は、保水剤混合なしの供試体層と比較して保水剤混合の供試体層はいずれの経過日数データについても高い値となっている。この原因として、混合なしの層は水に浸すことにより若干の粒子の再配置が起こり、供試体層が詰まり空隙率が小さくなるのみに対し、混合層では保水剤が水を吸収し、膨張して模擬土壌層の粒子間を押し広げ、みかけの空隙率が増加したことが考えられる。実験開始前の層高270 mmに対して、混合なしの層では実験開始時には、260~270 mmになっており、一方、保水剤を混合した層では、270~280 mmとなっている。

飽和毛管帯より上での保水剤混合の場合の水分分布は、混合なしと比較すると、表面に近くなるに従い水分量の違いが大きくなっている。これらの原因として、模擬土壌表面では保水剤が容易に膨張して粒子間を押し広げることができ、そこに保水剤自身が保水している効果のためと考えられる。なお、水分分布の経時変化は、保水剤混合なしの場合には、2日後までに水分分布は定常となった（そのためにFig. 1では2日後と14日後の結果を省略した）。しかし、保水剤混合の場合は、25日後に至っても水分分布が、若干変化する傾向がみられた。これは、自重による保水剤の水の再放出によるものと思われる。

Fig. 2に純水、赤外線ランプ照射の条件で保水剤混合の有無が水分分布に与える影響を示した。赤外線ランプ照射がある場合、乾燥が促進され模擬土壌表面近傍ではFig. 1と比べて低含水率となった。また、保水剤混合なしの場合も定常に至るまでに10日程度を要した。保水剤混合の有無を比較すると、混合なしの方が、水分の移動が容易なため供試体の下の層も乾燥が進んでいる。



Figs. 1, 2 Pure Water Content Profiles (With Radiation: Fig.2, Without: Fig.1)
 (△▲:2 days after, with and without SAP、□■:14 days after、○●:25 days after)

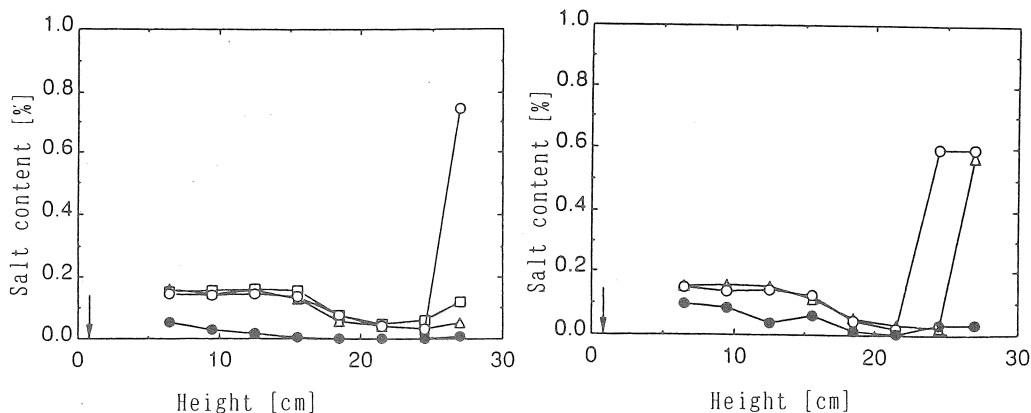


25 days after:
 ▲: without SAP, with radiation
 △: with SAP, with radiation
 ●: without SAP, without radiation
 ○: with SAP, without radiation

Fig. 3 Effect of Radiation and SAP on Water Content Profiles: Salt Water.

Fig. 3に塩水の場合について、赤外線ランプ照射の有無、保水剤混合の有無が水分分布に与える影響を示した。保水剤混合なしの供試体では純水を用いた場合とほぼ同様の結果を得た。一方、保水剤混合の供試体での水分分布は、混合なしの供試体での水分値より若干大きい値を示すものの、純水の場合と比べ差は顕著ではない。これは、塩類による保水剤の水分吸収力の減少によるものと説明される。赤外線照射を行った場合も保水剤添加による水分量増大の効果は若干みられる。保水剤混合の有無によらず照射により含水率は減少しているが、このことは、保水剤混合なしの場合には全体的に、また保水剤混合の場合には表層付近でみられた。以上の結果より、保水剤混合層では塩水の場合についても混合なしの場合に比して、水分移動に障害が生じていることが強く示唆される。

Fig. 4に赤外線ランプ照射なし、保水剤混合の条件での塩分分布を示した。赤外線を照射しない場合、保水剤混合なしの供試体と保水剤混合の供試体の両方とも、いくぶん模擬土壌表面近傍に塩類の集積が確認されたが、乾燥速度が遅いため、表層を除けば水分分布



Figs. 4, 6 Salt Content Profiles with SAP (With Radiation: Fig.6, Without: Fig.4. \triangle :2 days, \square :14 days, and \circ :25 days after salt water impregnation. \bullet :25 days after pure water impregnation)

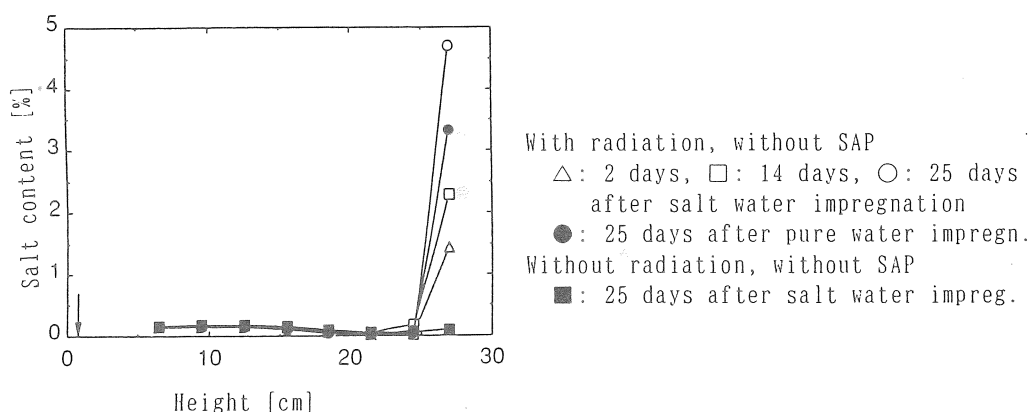


Fig. 5 Effect of Radiation on Salt Content Profiles without SAP.

とほぼ同様の分布となり、土壤中には塩分は濃縮されなかった。

Fi. 5に保水剤混合なしの条件で赤外線ランプ照射の有無が塩分分布に与える影響を、また、Fig. 6に保水剤混合で赤外線ランプ照射の条件下での塩分分布を示した。Fig. 5では、模擬土壌表面近傍に赤外線ランプ照射の場合、顕著な塩類集積が確認された。保水剤混合の場合 (Fig. 6)にも模擬土壌表面近傍に塩類集積が確認されたが保水剤混合なしの場合と比較すると、塩類集積はかなり抑制された。この現象も保水剤により水分の移動に障害が生じ、塩類集積が抑制されたためと考えることができる。また、比較のため実験開始時に純水に浸したものは、保水剤混合なしの場合には、顕著な塩類集積が確認されたが、保水剤混合の場合は、塩類集積がほとんど確認されなかった。これは、保水剤が純水に浸したときに塩水に比べ水分をより多く吸収し膨張したため、塩水の移動に対しても大きな障害を生じさせたためと考えられる。また、これらの現象は、表層からの蒸散量を抑制する

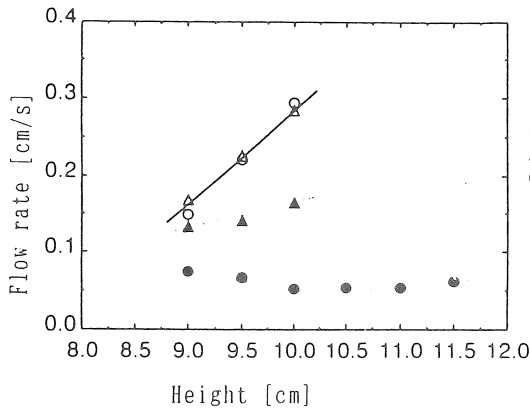


Fig. 7 Flow rate vs. bed height.

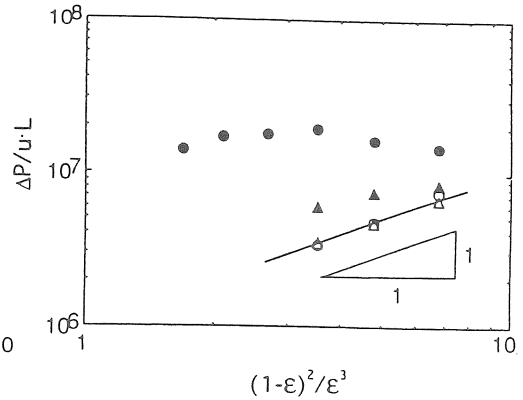


Fig. 8 Pressure drop vs. voidage.

(○:without SAP, pure water, ●:with SAP, pure water
 △:without SAP, salt water, ▲:with SAP, salt water)

効果も期待され、一方、温度分布も生じるものと予測される。さらに表層での集積については、その内部での塩分濃度分布も、今後更に詳細に検討する必要がある。

3. 2 流通抵抗実験

以上により、保水剤が水の移動抵抗となることが示唆された。ここでは別に行った流通抵抗の測定結果を層高と流速の関係としてFig. 7に示す。

保水剤なしの場合には層高とともに空隙率は増大しているが、保水剤混合の供試体に純水を流した場合は、保水剤が水分を吸収して膨張するため保水剤が空隙を埋めることになる。そのためビーズ層の高さを増やしても流速は増加しない。つまり、みかけ上流通抵抗はほぼ一定に保たれた。カラム実験においても保水剤が流通抵抗を増大させ、水分、塩分挙動に大きく影響を及ぼしていたことが本実験により確認できた。

一方、保水剤混合層に塩水を通した場合は、純水の時と比べると保水剤の膨張効果は減少しているが、ある程度流通抵抗は保持された。保水剤は純水に比し塩水を余り吸収しないものの、流通抵抗を増大させる効果は若干認められ、さきに述べたカラム中での水分、塩分移動に対する保水剤の効果を定性的に証明している。

これらのデータを、充填層内の流通を記述するコゼニーカーマンの式

$$u = \frac{\varepsilon^3}{k_0 S v^2 (1 - \varepsilon)^2} \cdot \frac{\Delta p g_0}{\mu L}$$

に従いFig. 8に再プロットした。ここで、 u は流速、 ε は空隙率、 Δp は圧力差、 g_0 は重力換算係数、 k_0 はコゼニー定数、 $S v$ は粒子の体積基準の比表面積、 μ は流体の粘度、 L は層高である。保水剤混合なしの供試体は、いずれの場合も傾きが1になり、上式を満足することが分かる。一方、保水剤混合の供試体は、上式を満たさないことがわかる。

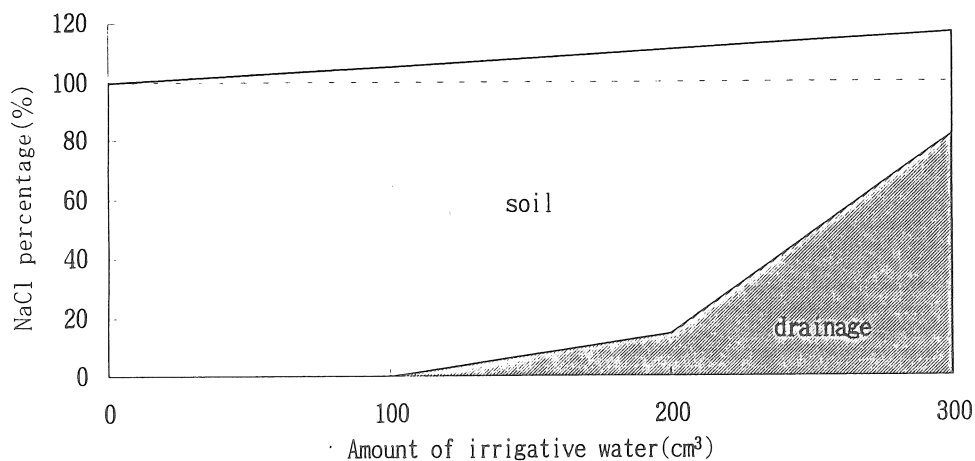


Fig. 9 Desalination efficiency by leaching.

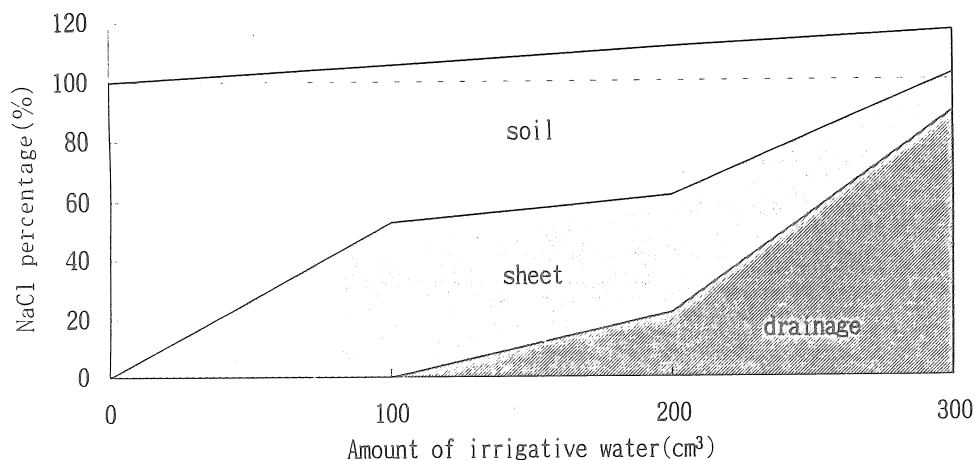


Fig.10 Desalination efficiency by DRY-UP

3. 3 D R Y - U P 法による除塩

リーチングとD R Y - U P法の除塩効率を比較して、Figs. 9-10に、中程度の灌漑水質であるNaCl濃度0.07%の除塩用水を用いたときの、水量の変化による除塩率の変化を示した。Figs. 9-10では、除塩前の土壤含有塩量を100%としてある。灌水量が多くなるに従って、総塩量が100%以上になっているのは、灌水に含まれている塩が付加されたからである。しかし、重要なのは除塩後にどれだけの量が土壤内に残留したかである。Figs. 9-10では、白い部分が土壤内に残留している塩量である。つまり、色の付いている部分が除塩できた量である。

また、今回の実験は排水条件の良好な状態で行ったため、Fig.10からわかるように灌水量が多いときのD R Y - U P法の総除塩量は、排水(リーチング)で除塩できた量も含んで

いる。そこで、灌水量が多いときのDRY-UP法除塩率は、作業手順が若干多くなるものの、リーチングよりもさらに良好となった。そして、灌水量が少ないときには、リーチングが全く除塩できないのに対して、DRY-UP法では、かなりの除塩効果が見られる。

3. 4 砂漠における太陽熱造水のエネルギー評価

乾燥地における灌漑農業を想定し、そのエネルギー評価を行った。植林のための必要水量として一年間、1平方m当たり600kgの純水をbasen型太陽熱造水により海水から得るとした。植林面積2に対し、1の造水装置が必要であることがわかった。併せて、多段フラッシュ法あるいは逆浸透法により淡水化を行う場合のエネルギー収支をも計算したが、森林から得られるバイオマスの有するエネルギーは、省エネルギープロセスである逆浸透法の必要エネルギーの約半分程度に過ぎないことがわかった。これより、効率的な太陽エネルギー利用プロセスが必要であることがわかった。

4. まとめと今後の課題

保水剤を模擬土壤に混合すると、保水剤が水を吸収、膨張し、粒子間を押し広げるとともに、保水剤自身が水分を保持していることから高含水率となる。保水剤混合なしの層では純水、塩水によらずほぼ同様の水分分布の結果が得られた。一方、混合層では塩分により、保水剤による水分量増大の効果が減少した。赤外線照射により乾燥を促進すると、保水剤がない場合にはその影響が、層全体に含水率の低下としてみられるのに対し、保水剤があると、この影響は表層に限定された。これらの傾向は純水ほど顕著ではないが、塩水の場合もみられた。

塩分分布は、赤外線ランプを照射しない場合は、水分分布と同様であった。一方、照射する場合には保水剤がないと模擬土壤表面近傍に顕著な塩類集積が確認されたが、保水剤混合層では、それが抑制された。以上に加え層の流通抵抗をも測定し、これらの結果から、保水剤により水分保持量が増すとともに、水分の移動が妨げられること、塩水の場合には純水の場合と比較して保水力は低下するものの、水分移動の抑制効果はある程度見られることが分かった。保水剤の有効性が示唆された。

塩類土壤からの脱塩法としてDRY-UP法を提案し、塩類捕集能力を検討したところ、リーチング法に比し、必要水量、水質の点から効率的な捕集法となり得ることが示唆された。

海水からの淡水製造プロセスの一次エネルギー評価を行い、従来型の造水法で水を作り、植林するだけでは二酸化炭素問題対策とはなり得ないことを明らかにした。しかしながら太陽エネルギー簡易造水装置を用いると、必要面積が膨大となった。

以上、自然エネルギーを用いる効率的造水法の開発と、さらなる節水法の開発が必要であることが確認された。

Analysis and Control of Salt and Water Behavior in Soil
for Greening of Desert and Prevention of Salt Accumulation,
and Energy Evaluation of Pure Water Production with Solar Energy

Toshinori KOJIMA, Dept. Ind. Chem., Seikei Univ.
Yukuo Abe, Inst. Agr. Forest Eng., Tsukuba Univ.
Shigeyuki Uemiya, Dept. Ind. Chem., Seikei Univ.

Distribution of water and salt was studied in an one-dimensional apparatus filled with glass beads with and without SAP (super absorbent polymer), to predict the behavior of water and salt in soil in arid lands. The permeability of the water or salt solution of 0.5% was separately examined. It was found that the layer with SAP always contained more water than that without SAP because of the expansion of SAP in glass beads void. It was also found that the rate of permeation was reduced with SAP because the blockage of the water pass was caused by the expansion of SAP with swelling. The above effects of SAP on the water content and the water permeability were also found for the case of salt solution, while they were not so remarkable as for the case of fresh water.

The layer with SAP restrained salt accumulation on its surface under the condition with promoted evaporation by infrared lamps. In conclusion, SAP prevents water and salt in it from moving in the layer, leading to restraint of evaporation and salt accumulation.

Problems of salt removal and disposal from irrigated farm-land or discarded land in arid and semi-arid regions of the world are pointed out. However there has not been proposed efficient method for the resolution of these problems yet. Therefore we tried a new salt removal method based on the concept which dispose of the salt at soil surface by utilizing evaporation force and using salt capture sheet.

It was confirmed experimentally that salt accumulated in the surface layer was removed by the DRY-UP method more efficiently than the leaching method. Furthermore it was recognized that the DRY-UP method has advantages which can basically use less quantity and bad quality of water.

Lastly, the energy balance of afforestation by using water made by solar still showed that it requires half of the afforestation area in desert.