

土壤塩性化におけるエネルギーの散逸

Energy Dissipation in a Soil Salinisation Process

関 平 和 (せき ひらかず)

金沢大学大学院教授 自然科学研究科

1. はじめに

環境が悪化した土壤の修復に要するエネルギー、あるいはそれを反映するものとしての費用は莫大である。したがって、修復時にエネルギーの散逸（利用されないまま無効なエネルギーに転化すること）をできるだけ低く抑えうような技術・操作を検討することが、エネルギー節約の観点から重要と考えられる。上記観点から本稿では、土壤環境悪化プロセスの一例である農地の塩性化問題を対象に、エネルギー散逸機構を簡単な塩性化基礎実験の結果を通じて明らかにする。

2. 土壤塩性化とは

図-1に示すように、降雨が少なく蒸発速度の大きい地域では、地下水位が高いとき、地下水面から浸出した塩分が上方へ運ばれ、土壤表面近傍の塩濃度が増加し、場合によっては塩分の集積が起こる。これを土壤塩性化という。土壤断面内の塩分濃度が上昇したり、塩分が過剰に蓄積すると農業生産力は低下する。安定的な作物供給のためには塩性化の防止・修復対策が欠かせない。

3. エクセルギー解析とその意義

一般に、系の持つエネルギーは有効部分（エクセル

ギー）と無効部分（アネルギー）の和で表され、前者の割合が高いほうがエネルギーの質が高いことが知られている¹⁾。着目系のエクセルギーの割合が小さくなることはその系が悪化したものと見なし得るから、変化のプロセスにおけるエネルギーの散逸機構を知ることは、散逸したエクセルギーの効果的、効率的な補充方法、すなわち、悪化した系の適切な修復方法を検討することにはかならない。本稿で取上げたエクセルギー解析の意義はそこにある。なお、エネルギーの散逸とはエクセルギーの散逸と同義なので、以下、エネルギーの散逸のことをエクセルギーの散逸と表記する。

4. 塩性化過程の理論的取扱い

4.1 熱・物質移動モデル

ここでは円筒型容器内に充填した試料土を用いた塩性化実験を室内で行った。したがって、モデル化はこの実験条件に即して行った。詳細なモデル化の方法論の説明は本論文の趣旨から外れるので省略するが、Philip & deVries (フィリップとド・フリース)²⁾、Campbell (キャンベル)³⁾の方法に基づいて、塩性化過程における土壤内の体積含水率 θ 、溶質濃度 C 、温度 T の時間的・場所的変化を支配する基礎方程式を導いた。土壤表面と底面において適切な境界条件を設定すれば、差分法により、初期から微小時間刻み Δt ごとに水分、溶質濃度、温度分布を逐次計算することができる。

4.2 エクセルギー収支式と散逸関数

土壤要素単位容積あたりのエクセルギーを f_X とすると、これは、要素内各相各成分の寄与の総和として与えられる⁴⁾。この場合、3.で指摘したように、エクセルギーは変化の過程で散逸し、保存量ではないため、 f_X の時間的変化率はエクセルギーの正味の流入速度と、試料容器側面からの熱エクセルギーの流出速度と、不可逆現象に伴うエクセルギー散逸関数の和に等しい。

塩性化プロセスで起こる不可逆現象は、熱伝導、液状水移動、溶質分散、蒸気拡散、水分蒸発・凝縮、溶質の析出・溶解の六つであるが、本実験では液状水の移動速度が小さいことと、析出・溶解現象がほとんど可逆現象とみなせることからこれらによるエクセルギーの散逸は実質的に無視できる。したがって、残り四つの現象（熱伝導、溶質分散、蒸気拡散、水分蒸発・凝縮）に着目し、それらによる散逸関数 E_{d1} , E_{d2} , E_{d3} , E_{d4} を導いた⁴⁾。

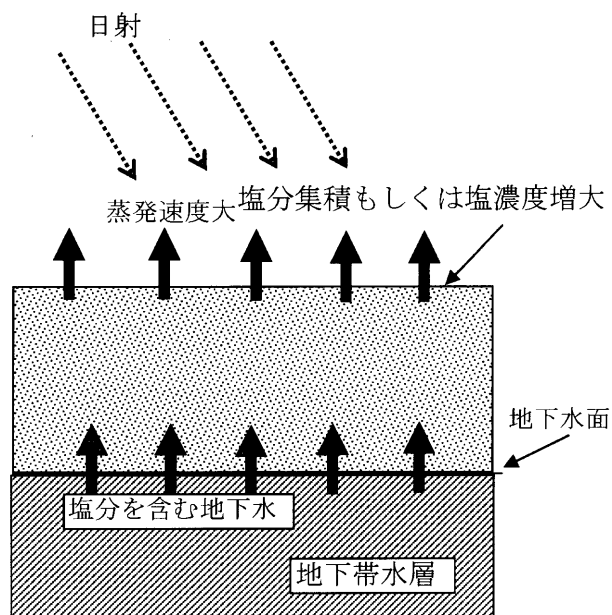


図-1 塩性化の進行過程

5. 実験装置と実験方法

5.1 実験装置

図-2に実験装置の概略を示す。地下水面が地表下0.5 m以下の浅い位置にあり、塩性化が起きやすい条件を模擬するため、実験装置は高さを0.42 mとし、内径が0.15 mのポリエチレン製二重円筒カラムで作製した。

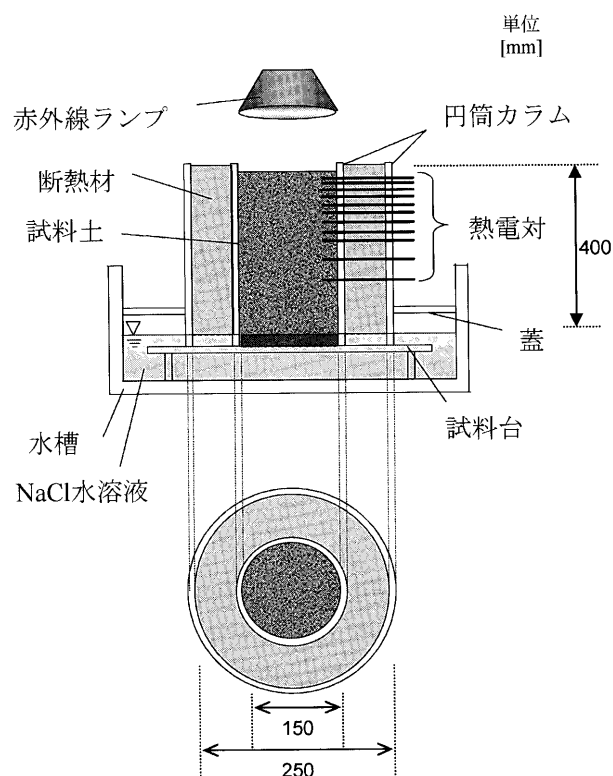


図-2 実験装置

内円筒と外円筒の間の環状部に断熱材として粒状発泡ポリスチレン樹脂を充填し、側面への熱の漏洩を抑えた。試料土を内側円筒内に充填した。試料土表面から約0.2 m上の位置には日射に見たてた赤外線ランプを設置し、試料土内には高さ方向に所定の間隔で10本の熱電対を挿入して温度を測定できるようにした。試料土底部から0.02 mまでの部分は塩水に浸し、底面で飽和状態を維持できるようにした。試料土は5号砂（平均粒子径0.5 mm）と7号砂（平均粒子径0.2 mm）の2種類とした。

5.2 実験方法

試料土を試料容器に充填した後、濃度0.1 mol/lのNaCl水溶液を上部から注ぎ、飽和状態にした。注水を停止してから24時間放置し重力水を排出させた後、赤外線ランプにより試料土表面に照射し、塩性化実験を開始した。実験中の高さ方向温度分布は熱電対を介して自己記録計により連続的に測定・記録した。7~10日間経過後、温度、水分、濃度分布が時間的にほとんど変化しなくなった時点で実験を終了し、任意の高さごとに試料を採取して体積含水率をハロゲン水分計で、溶質濃度を電気伝導度計で測定した。

6. 結果と考察

6.1 熱・物質移動モデルの妥当性

図-3に、幾つかの実験のうちの代表例を取り上げ、実験終了時（5号砂：192 h, 7号砂：168 h）における土壌層内温度、体積含水率、溶質濃度分布実測値を、モデルによる計算結果とともに示す。まず5号砂については、 $z \geq 0.3$ mの領域で温度上昇が顕著であること、含水率は底面近傍から $z = 0.15$ mまでに大きく低下する

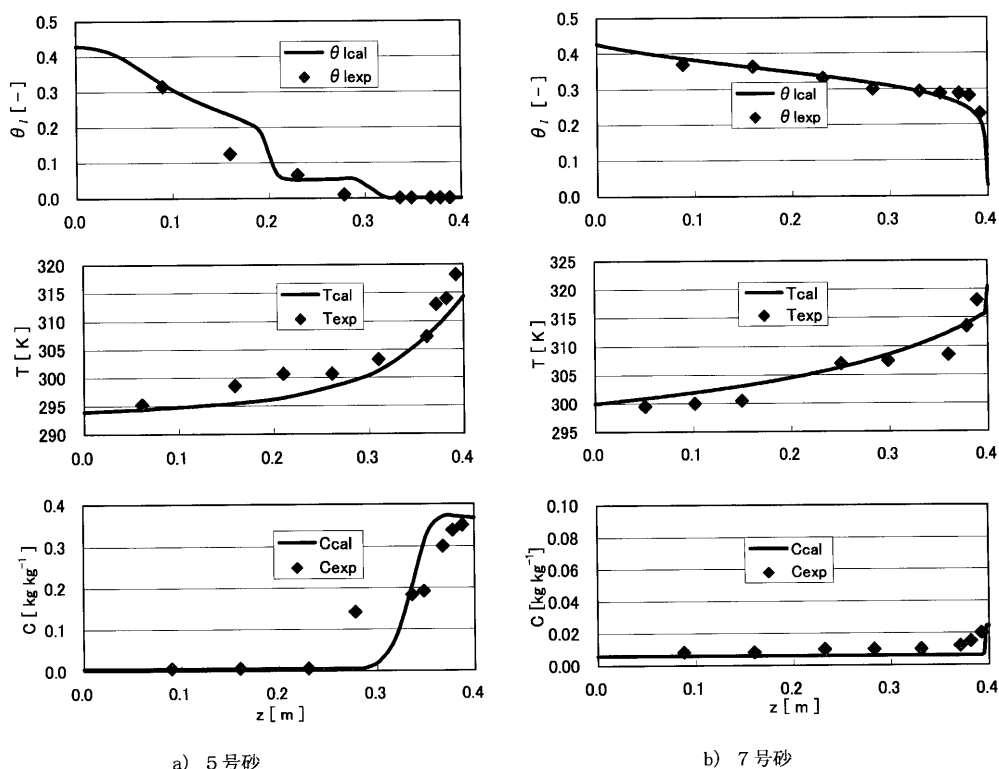


図-3 実験結果と計算結果の比較の一例

論 文

が、 $z=0.25$ m 付近まで緩やかに低下し、表層0.1 mの領域では乾きあがりが起こっていること、溶質濃度分布は $z=0.3$ m以上の乾燥領域において急激に増大していることなどの特徴がみられる。計算結果はこれらの結果をよく反映している。ただし、塩析析出は起こらなかった。

一方、7号砂については、表層約0.02 mの領域の温度上昇が顕著であること、含水率の低下も表層約0.02 mの領域で急激であること、溶質濃度は表層においてだけ急増するが、到達濃度は 0.02 kg kg^{-1} でそれほど大きくないことなどの特徴がみられ、計算結果はこれらの実測値の傾向をおおむね反映している。また、196時間の塩性化実験において32.18 gの塩分が表面に析出した。シミュレーションによる計算値は27.8 gで実測値とほぼ一致した。

以上の結果より、ここで述べた数学的モデルによる塩性化時の土壌内の熱・水分・溶質移動プロセスの計算結果は、表面で濃度上昇の起こった5号砂と、塩析析出の起こった7号砂の実験結果をおおむね良好に再現できており、モデルはほぼ妥当であるといえる。

6.2 エクセルギー収支

定常状態における系内へのエクセルギーの流入および流出量（単位時間当たり）の実験値から正味の流出量を求め、その値に側面からの放熱による流出エクセルギー量を加えることにより散逸エクセルギー量（単位時間当たり）を算出した。その結果を、表-1に示した。ただし、7号砂については、表面近傍の温度実測値から温度勾配を正確に算定できなかったため、表面へ供給された熱的エクセルギー量を正確に見積もることができず、散逸エクセルギー量の実験値を得られなかった。

表-1によれば、5号砂については散逸エクセルギー量（ $15.73 \text{ kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ）は土壌表面から流入したエクセルギー量の約60%に相当することが分かる。7号砂では蒸発速度が大きかったため底面から浸出する塩水のエクセルギー量が $283 \text{ kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ と大きかった。

一方、表-1にはモデルによる散逸エクセルギー量の計算結果も併記した。5号砂については、計算値（ $9.65 \text{ kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ）は実測値（ $15.73 \text{ kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ）よりも約40%小さいが、表面熱流束の測定精度を考えると両者の一致度はほぼ満足できるものと考えられる。7号砂については散逸量が5号砂の約30倍と大きかった。また、表-2にモデルから計算された定常状態における各散逸関数の系内積算値（ ΣE_{d1} , ΣE_{d2} , ΣE_{d3} , ΣE_{d4} ）を示した。エクセルギーの散逸は5号砂の場合はほとんどが熱伝導（ ΣE_{d1} ）、7号砂の場合には大部分が水分蒸発（ ΣE_{d4} ）、ついで熱伝導（ ΣE_{d1} ）の形で起こったことが分かる。

定常状態における散逸関数の高さ方向分布を求めたところ、5号砂では E_{d1} と E_{d3} が土壌表面において顕著であるものの、深さ0.1 mまでの領域に限定されていた。

表-1 エクセルギーの流入，流出，放散，散逸速度の実験値と計算値の比較

		エクセルギー 流入速度 [$\text{kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]	エクセルギー 流出速度 [$\text{kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]	熱の漏洩によ るエクセル ギー放散速度 [$\text{kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]	不可逆現象に よるエクセル ギー散逸速度 [$\text{kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]
5号砂	実験値	0.0990	-25.8	10.17	15.73
	計算値	0.0985	-16.9	7.35	9.65
7号砂	実験値	283.0	—	5.66	—
	計算値	282.4	-42.95	7.75	317.5

表-2 定常状態における各散逸関数の系内積算値

	ΣE_{d1} (熱伝導) [kJ h^{-1}]	ΣE_{d2} (溶質分散) [kJ h^{-1}]	ΣE_{d3} (蒸気拡散) [kJ h^{-1}]	ΣE_{d4} (蒸発・凝縮) [kJ h^{-1}]
5号砂	1.67×10^{-1}	2.19×10^{-4}	0.0	8.07×10^{-3}
7号砂	8.96×10^{-1}	3.83×10^{-3}	6.13×10^{-3}	$1.09 \times 10^{+1}$

7号砂では E_{d4} が土壌表面でしか値を持たないことが分かった。砂の種類によって散逸量の絶対値と散逸の起こる場所が異なるが、散逸に大きくかわる現象はおおむね土壌表面から0.1 m程度の表層に限られた。

7. ま と め

塩性化土壌の除塩対策としては溶脱法（リーチング法）が、排水と抱合せで実施される。現在、たとえば塩性化被害が著しい中央アジア乾燥地などで大々的な実施が期待されている⁵⁾。この場合、灌漑と排水のバランス制御をうまく行うために、溶脱に使う河川水の供給量、供給方法、排水工法の選定、実施要領を検討するに当たり、総合的にエネルギー効率の高いシステム構築が必要となる。そのためには、システムの熱・物質移動解析に加えエクセルギー解析が役に立つものと思われる。

本稿では塩性化時のエクセルギー解析のみに検討を限定したが、今後は、本モデルを修復過程に拡張し、最も効果的かつ効率的な修復過程の方式・操作を所要エクセルギー最小化の観点から論ずることとしたい。

参 考 文 献

- 1) Jorgensen, S. E.: Thermodynamics and Ecological Modelling, Lewis Publishers, pp. 1~373, 2001.
- 2) Philip, J. R. and deVries, D. A.: Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans. Am. Geophys. Uni., Vol. 38, pp. 222~232, 1957.
- 3) Campbell, G. S.: Soil Physics with Basic, Elsevier, pp. 1~150, 1985.
- 4) 関 平和：土壌塩性化の非定常エクセルギー解析，環境システム研究，27, pp. 799~804, 1999.
- 5) 北村義信：乾燥地の灌漑農地における水管理の実態と今後の課題，農業環境工学関連4学会2001年度合同大会講演要旨，pp. 346~353, 2001.

(原稿受理 2004.4.28)