

減圧蒸発過程における塩含有砂中の熱と水分の移動

東京大学 大学院農学生命科学研究科 溝口 勝・末継 淳・井本博美・宮崎毅

Heat and moisture transport in saline sand during evaporation under reduced pressure

Masaru Mizoguchi, Atsushi Suetsugu, Hiromi Imoto and Tsuyoshi Miyazaki

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo,
Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657
E-mail: mizo@soil.en.a.u-tokyo.ac.jp

Abstract: Moisture transport in porous media may be affected by soluble salt. To understand the effect of NaCl concentration to the moisture transport, we have measured changes in temperature, soil moisture content and salt content in saline sand under a reduced pressure. As a result, we found that sand containing much NaCl did not freeze and that the evaporation amount increased with NaCl concentration. These results can be explained in terms of freezing point depression of liquid solution which moves to the surface during evaporation under reduced pressure.

Keywords: Moisture transport, Evaporation, Salt, Freezing, Latent heat

1. はじめに

火星の地下に存在するといわれる水の利用を想定した場合、地中における氷から水蒸気への昇華・水蒸気による移動・水蒸気凝縮過程を考慮した水分移動論が必要になってくる。Clifford¹⁾は、火星の地殻形成過程において永久凍土層と地下水層との間における水蒸気と液状水の循環流の重要性を指摘している。

これまで地中（特に表層土）における水分移動は、Darcy の法則に基づいた飽和間隙水の移動論に始まり、乾燥地における農業を実現するための水蒸気移動論や寒冷地における土木工学や農学的な視点からの凍結・融解を伴う水分移動論へと発展してきた。しかし、表層土中における水分移動はあくまでも地球上で起こる現象を扱ったものであり、これらの法則が地球以外の環境下でも成立しうるのかどうか、室内実験レベルではほとんど検証されていない。

一昨年溝口らは、周囲を断熱し上面のみを開放した条件下で砂カラム中の温度を測定し、減圧過程では水の気化熱の損失によって水分を含んだ砂が凍結すること、その時の温度変化は初期含水量に依存していることを明らかにした²⁾。しかし、その過程における水分移動のメカニズムは明らかにできなかった。そこで、昨年は土壌水分センサーと熱電対を用いて、減圧蒸発過程における砂中の水分量と温度の変化を同時測定した³⁾。その結果、蒸発前線で温度勾配が逆転し、その位置が時間と共に移動すること、通常の熱伝導よりも試料

内部の温度低下が速いことを明らかにし、試料内部からの Knudsen 流的な蒸発の可能性を示した。

内部から蒸発が起きているとすれば、塩分を含んだ試料中では水分の移動に伴う塩分の移動は起こらないと考えられる。そこで、本研究では内部蒸発の可能性を検証するために、塩含有砂を用いて減圧蒸発実験を行い、その過程における水分・温度・塩分分布の変化を測定した。加えて、水分と熱移動に及ぼす塩濃度の影響について調べた。

2. 実験方法

(1) 試料 豊浦珪砂を用いた。この風乾試料に NaCl 溶液を加えて、初期含水比(水質量/炉乾砂質量)を 10% に調整した。NaCl 溶液濃度は 0, 0.2, 1, 2, 5, 10, 20% である。

(2) 実験装置 一昨年の溝口の実験と同様に、デュアール瓶(口径 4.5cm, 高さ 20cm, 容積 500ml)、真空デシケータ、およびデータロガー内蔵のサーミスタ温度計(直径 30mm・厚さ 15mm, TidbiT オンセット)を用いた。

(3) 実験手順 NaCl 溶液濃度の異なる各試料を各デュアール瓶に乾燥密度 1.43Mg/m³ で充填する。試料の深さ 1cm, 6cm, 11cm の位置には温度計を埋設する。各充填試料の質量を測定した後、室温 20・大気圧下のデシケータに 1-2 時間放置し、真空ポンプでデシケータ内の圧力を下げる。0.2-0.3kPa で 168 時間(1 週間)排気を続けた後、充填試料の質量を測定する。温度計を回収しながら

ら、2 cm 深さごとに砂を採取し、含水比と塩分量を測定する。塩分量は 1:5EC 法により電気伝導度で表示した。

この実験系で砂の代わりに水を用いて熱損失量を求めたところ、デュア-瓶からの熱損失率は $77 \text{ W/m}^3 \cdot \text{K}$ であった。この量は、試料上面からの蒸発による熱損失に比べると十分に小さく、擬似的な一次元の実験系が実現されたと考えられる。

3. 結果と考察

(1) 実験後の試料の状態

Fig.1 は実験後に観察した試料の状態である。0-5%の試料は表層から十数 cm ほど乾燥し、その直下が凍結していた。1%の場合には、その凍結層の下に乾燥・未凍結・凍結層が見られることもあった。それに対し、10%と20%の試料では表層に4cm厚の塩クラストが形成され、その下に乾燥層、そしてさらにその下に未凍結の湿潤層が形成された。減圧乾燥過程におけるこうした層の形成は、蒸発に伴う乾燥、潜熱損失による凍結、塩濃縮によるクラスト形成や氷点降下などの現象が組み合わされて起きた結果と考えられる。

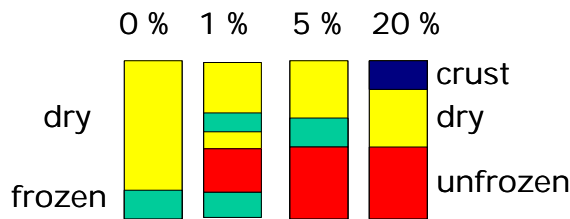


Fig.1 Sample sketch after experiment for each NaCl concentration.

(2) 温度の時間変化

Fig.2 は塩を含む (NaCl 溶液濃度 10%) 試料と含まない試料で測定した深さ 1cm と 11cm における温度変化である。塩を含まない場合、1cm 深の温度が 7 時間で -2.3 になった後、瞬間的に -1.6 に上昇し、その後 15 時間まではほぼ一定の温度を保ったが、それ以降は徐々に上昇しプラスの温度になった。また、11cm 深の温度は 7-44 時間で -4 を保ち、その後さらに徐々に低下しながら、72 時間以降実験終了の 168 時間まで -8 のままだった。それに対して、塩を含む場合には、1cm 深の温度は最低でも 2 までしか低下せず、5-37 時間でほぼ一定で推移し、37 時間以降は徐々に上昇した。また、11cm 深の温度は 16-100 時間でほぼ -2.5 の一定の値となり、100 時間以降は徐々に上昇した。こうした一連の温度変化は、塩分による氷点降下によって説明できる。すなわち、塩を含

まない場合には試料が凍結するが、塩分濃度の高い場合 (10%以上) では氷点降下により試料が凍結しないことによると考えられる。

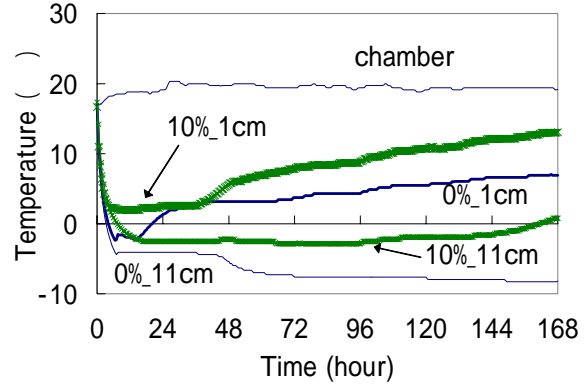


Fig.2 Temperature as a function of time in wet sand with/without NaCl. Initial water content was 10 %.

(3) 含水比分布の変化

Fig.3 は実験終了後に測定した含水比分布である。いずれの NaCl 濃度に対しても、0-11cm では 0.2%以下まで乾燥していたが、13cm 以深では水分が保持されていることがわかる。17cm 深で比較すると、塩分濃度が高いほど含水比が小さかった。これは塩分濃度によって、減圧蒸発過程の水分移動量が異なることを意味する。

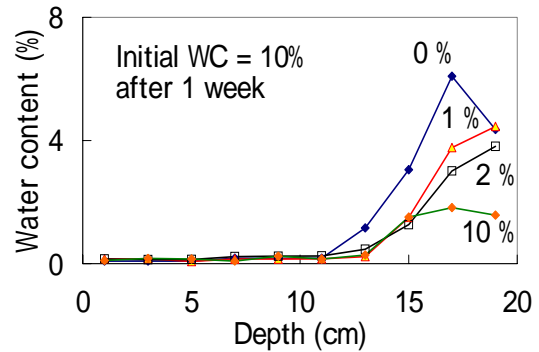


Fig.3 Water content profiles in sand containing NaCl solution (0-10%) after experiment.

(4) 塩分分布の変化

Fig.4 は実験後に採取した試料に 5 倍の純水を加えて抽出した溶液の電気伝導度 (1:5EC) で表示した塩分分布である。縦軸は対数で示してある。これをみると、塩分が下層から表層に移動していることがわかるが、塩分濃度による移動の程度がわかりにくいので、19cm 深における EC 値と各深さにおける EC 値の比を相対濃度と定義し、その

分布を Fig.5 に示した。このグラフから、相対的にみると、塩分濃度 2%の試料において最も塩分が表層に移動しやすいことがわかる。10%でも表層に向かって塩分の移動が見られるものの、1cm 深の相対濃度はむしろ低下した結果が得られた。これは、Fig.1 でも示したように、塩分濃度 10-20% では表層に塩クラストが形成され、そのクラストに含まれる塩分が標準の 1:5 抽出法では容易に抽出されなかったことによると思われる。いずれにせよ、Fig.4, Fig.5 の結果は、塩分が減圧蒸発過程で試料内部から表層に移動する事実を示しており、このことから、今回実験した初期含水比 10%の試料中では表層に向かって液状水による水分移動が生じていたことを意味する。

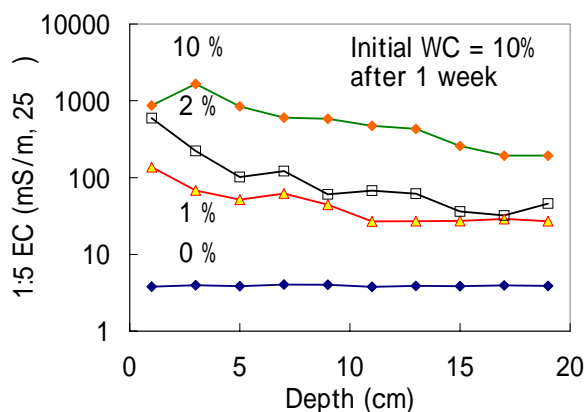


Fig.4 Salt redistributions in sand containing NaCl solution (0-10%) after experiment. Salt content is represented by 1:5 EC (Electrical conductivity).

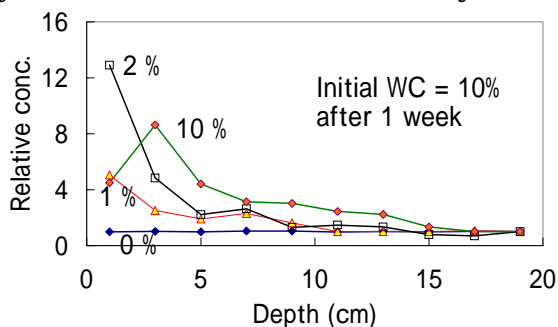


Fig.5 Relative concentration (RC) profiles in sand containing NaCl solution (0-10%) after experiment. RC is defined here as a ratio of EC in each depth to the EC in the bottom.

(5) 積算蒸発量

Fig.6 は積算蒸発量と塩分濃度の関係である。実線は実験前後の試料の質量差からの実測値、四角

印は含水比分布からの推算値である。両者は良好に一致し、本実験の精度の高さを裏付けている。積算蒸発量は塩分濃度が高いほど多かった。これは、Fig.1 にも示したように、塩分濃度が低い場合には凍結層が形成されることにより試料内部の水分移動が阻害されるのに対し、塩分濃度が高い場合には氷点降下により凍結しないため試料内部の水分が液状で連続的に移動することによる。

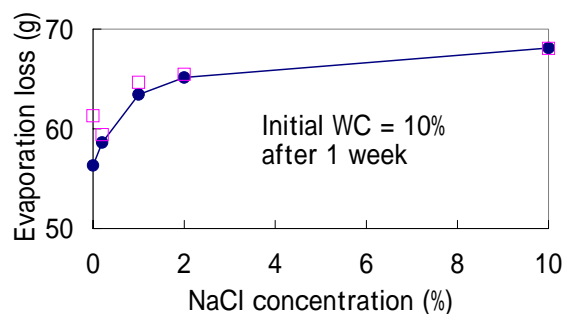


Fig.6 Evaporation loss as a function of NaCl concentration. Solid line denotes the values from difference in sample weight before/after experiment, square denotes the values calculated from the water content profiles.

4. おわりに

本研究により、減圧蒸発過程における水分と熱の移動に塩分が関与する実態が明らかになった。すなわち、減圧蒸発過程で、(1)低塩分濃度では試料が凍結するが高濃度では試料が凍結しない、(2)液状水移動に伴い塩分が表層に移動する、(3)塩分濃度が高いほど蒸発量が多い、ことなどである。これらは、減圧蒸発に伴う乾燥、潜熱損失による凍結、塩濃縮によるクラスト形成や氷点降下などの現象が組み合わさって起きた結果と考えられる。

本研究はあくまでも宇宙環境を「想定」したものであるが、本研究成果が火星移住のような夢のある宇宙利用計画に貢献できたならば幸いである。

参考文献

- 1) Clifford, S. M., The role of thermal vapor diffusion in the subsurface hydrologic evolution of mars, *Geophysical Research Letter*, 18, pp.2055-2058 (1991)
- 2) 溝口勝・登尾浩助：低温・低圧・微重力条件下の多孔質体中における水の移動現象, *Space Utilization Research* 17, pp. 116-118 (2001)
- 3) 阿部勇児・溝口勝・井本博美・宮崎毅：減圧蒸発過程における砂中の熱と水分の移動, *農業土木学会講演要旨集* pp.354-355(2002)