

## 減圧蒸発過程における砂中の水分と塩分の移動

### Moisture and salt movements in sand during evaporation under reduced pressure

溝口 勝・末継 淳・井本博美・宮崎毅

MIZOGUCHI Masaru SUETSUGU Atsushi IMOTO Hiromi MIYAZAKI Tsuyoshi

#### 1. はじめに

火星の地下に存在す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る。溝口らは、減圧過程で砂カラム中の温度を測定し、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<sup>1)</sup>。また、減圧蒸発過程における試料内部からの Knudsen 流的な蒸発の可能性を示した<sup>2)</sup>。

内部から蒸発が起こっているとすれば、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。

#### 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、初期含水量を 10% に調整した。溶液濃度は 0, 0.2, 1, 2, 5, 10, 20% である。
- (2) 実験装置 デュアー瓶 (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 (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瓶に乾燥密度 1.43Mg/m<sup>3</sup> で充填する。試料の深さ 1cm, 6cm, 11cm の位置に温度計を埋設する。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、2 cm 深さごとに砂を採取し、含水量と塩分濃度を測定する。塩分濃度は 1:5EC 法により電気伝導度で表示した。

#### 3. 結果と考察

##### (1) 実験後の試料の状態

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、さらにその下に未凍結の湿潤層が形成された。

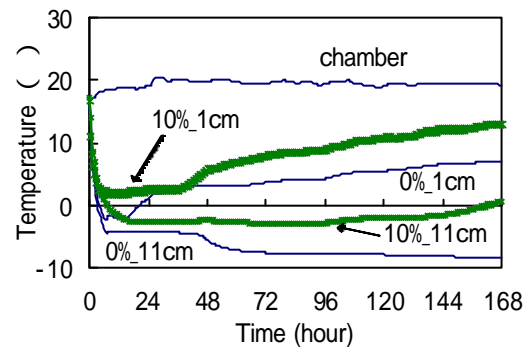


Fig.1 Temperature as a function of time in wet sand with/without NaCl. Initial water content was 10%.

##### (2) 温度の時間変化 (Fig.1)

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 時間までほぼ一定の温度を保ち徐々にプラスの温度になった。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た後、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 (溶液濃度 10%) には、1cm 深の温度が最低でも 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。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。こうした温度変化は、塩分による凝固点降下によると考えられる。

(3) 含水比分布の変化 (Fig.2)

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た。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。

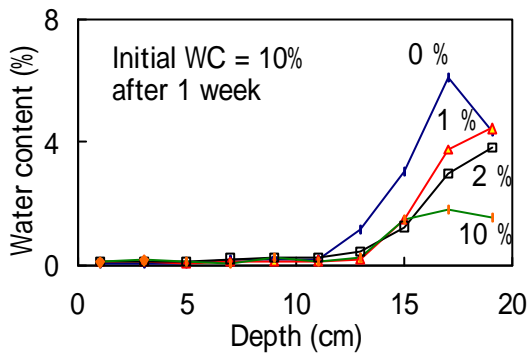


Fig.2 Water content profiles in sand containing NaCl solution (0-10%) after experiment.

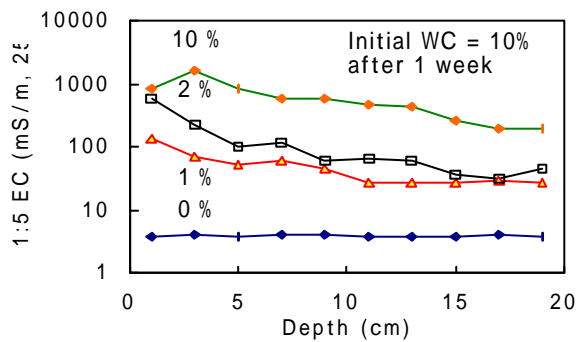


Fig.3 Salt redistributions in sand containing NaCl solution (0-10%) after experiment. Salt content is represented by 1:5 EC (Electrical conductivity).

(4) 塩分分布の変化 (Fig.3)

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かった。10%でも表層に向かって塩分の移動が見られるものの、1cm 深ではむしろ低下した。これは塩分濃度 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。この結果は、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。

(5) 積算蒸発量と塩分濃度の関係 (Fig.4)

積算蒸発量は塩分濃度が高いほど多かった。これは塩分濃度が低い場合には凍結層が形成され、試料内部の水分が氷から水蒸気に昇華しながら水蒸気で移動したのに対し、塩分濃度が高い場合には凝固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したことによる。

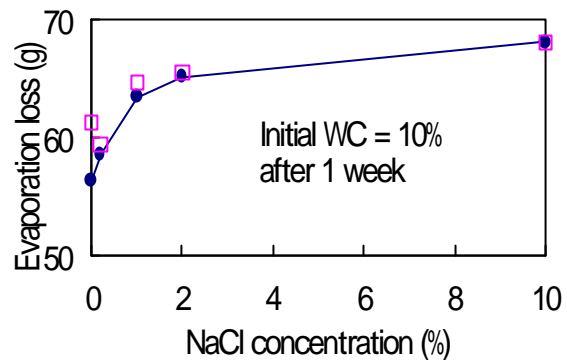


Fig.4 Evaporation loss as a function of NaCl concentration. Solid line denotes the values from difference in sample weight before/after experiment, square denotes the values calculated from the water content profiles.

4. おわりに

減圧蒸発過程において、(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 ことがわかった。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凝固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、(財)日本宇宙フォーラム公募地上研究の助成を受けた。

参考文献

1)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)  
 2)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)