

減圧条件下における砂中の熱と水分の移動

溝口 勝*・登尾浩助**・関勝寿*・井本博美*・宮崎毅*
* 東京大・院・農 ** 岩手大・農

Heat and moisture transport in sand under a reduced pressure

Masaru Mizoguchi *, Kosuke Noborio **, Katsutoshi Seki *, 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

** Faculty of Agriculture, Iwate University, Ueda 3-18-8, Morioka, Iwate 020-8550
E-mail: mizo@soil.en.a.u-tokyo.ac.jp

Abstract: Moisture transport in porous media is one of the most important subjects to design space utilization from the viewpoints of hydrology, agriculture and civil engineering. We have measured changes in temperature and soil moisture content in sand columns to understand mechanism of moisture transport under a reduced pressure. As a result, we found that evaporation front moved into sand with absorbing the latent heat and that moisture escaped from regions deeper than the evaporation front for the sand column with low initial moisture content. In addition, we measured thermal properties of the sand as a function of moisture content by dual probe heat pulse method. *Keywords*; Moisture transport, Evaporation, Reduced pressure, 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考えると、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であるのかどうか、室内実験レベルではほとんど検証されていない²⁾。

昨年溝口ら³⁾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。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、今年は土壤水分センサーを用いて、減

圧過程における砂中の水分量と温度の変化を測定した。また、用いた砂の熱物性を本研究で試作したプローブを用いて実測した。実験は現在も継続中なので、本論文では現在までに得られたデータを示しながら、砂中の水分移動と熱移動について考察する。

2. 実験方法

(1) 試料 昨年と同様に豊浦珪砂を用いた。双極熱パルス法⁴⁾（本研究でプローブを試作）を用いて実測した豊浦珪砂（乾燥密度 1.45g/cm³）の熱物性値と含水量の関係を Fig.1 に示す。

(2) 実験装置 アクリル円筒容器（内径 12cm, 高さ 30cm）、真空デシケータ（内寸 W25cm, D30cm, H41cm）、データロガー（CR23X; Campbell Scientific Inc.）、土壤水分計（ECH₂O-10; Decagon Inc., 長さ 10cm・幅 3cm・厚み 1mm の帯状）および熱電対を用いた。土壤水分計⁵⁾はフィールド用に最近開発された誘電率測定型のセンサーで、それを室内実験用に改良して用いた。正確な水分量を得るためには試料ごとにキャリブレーションが必要がある（現在実験中）が、本論文ではとりあえず、初期含水比に対する水分計の出力電圧の相対値を水分量指標と定義して用いた。

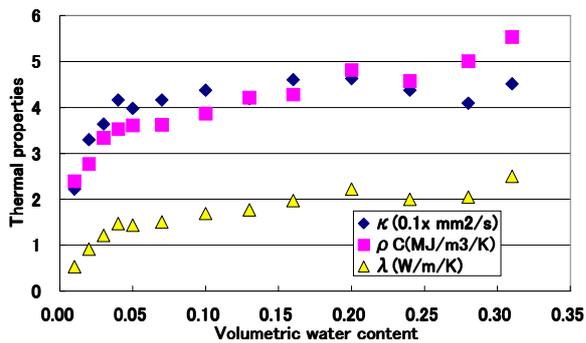


Fig.1 Thermal properties measured by dual probe heat pulse method for Toyoura sand (rod #1).



Fig.2 Soil moisture sensor (ECH₂O-10) improved for this study.



Fig.3 Sand column inserted sensors for the measurement of moisture content and temperature.

(3)方法 試料の初期含水比(水分質量/砂質量x100)を5%, 10%, 15%, 20%に調整して、底付の亚克力円筒容器に乾燥密度 1.45g/cm³ で充填する。深さ 5cm, 15cm, 25cm の位置に土壌水分計を直径に沿って鉛直に挿入する。こうすることで、

土壌水分量に関してはそれぞれ 3.5-6.5cm, 13.5-16.5cm, 23.5-26.5cm の範囲にある土壌ブロック内の平均値が測定できる。また、深さ 1cm ごとに熱電対を円筒容器側面から 2cm の位置に挿入する。

室温 20 °C ・大気圧下のデシケータに 1-2 時間放置し、真空ポンプで 24 時間排気してデシケータ内の圧力を下げる (Fig.3)。昨年の実験ではデュア一瓶に充填した試料の温度だけを測定したが、今年は土壌水分計を側面から挿入して水分量の変化も測定した。そのため、試料側面の断熱はしていない。

3. 結果と考察

(1) 温度の時間変化

Fig.4 は初期含水比 5% の試料に対する各深さごとの温度変化である。減圧開始後 1.5 時間で 1cm 深の温度は 19 °C から 8 °C くらいまで低下し、その後緩やかに上昇し、24 時間では 17 °C くらいになった。2cm 深および 3cm 深でも同様に、それぞれ 4 時間および 5.5 時間で温度が最小となり、その後緩やかに上昇した。それに対して、4cm 深や 5cm 深では 9 °C 程度まで温度が低下し、しばらく一定温度を保った後、温度が上昇する傾向を示した。温度上昇の開始時間は 5cm 深の場合、約 14 時間だった。

減圧開始直後からの温度低下は試料表面からの水分蒸発に伴う蒸発潜熱の損失によると思われる。側面と底面を断熱した昨年の実験ではこの蒸発によって試料内部が凍結したが、本実験系では周囲の断熱が不十分なので試料側面から熱が供給され、凍結には至らなかったものと考えられる。4cm 以深の各深さで温度一定期間が存在するのは蒸発熱の損失と下方から移動してきた水蒸気の凝縮および側面から流入する熱量がバランスしているためと思われる。

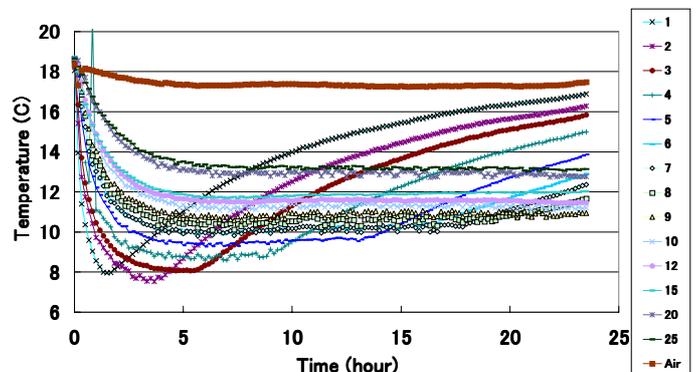


Fig.4 Temperature as a function of time in 5% sand column under vacuum.

(2) 温度分布の変化

Fig.5 は初期含水比 5%の試料に対する 1 時間ごとの温度分布である。最初 19 °C で均一だった温度は 1-2 時間で表面から順に低下し、25cm 深で 15 °C 程度になった。その後、3 時間以降では表面から順に温度が上昇し、“く”の字形の分布となり、温度勾配が逆転する位置が時間経過に伴って下降していった。

初期含水比 5%という豊浦砂としては比較的乾燥した水分条件を考慮すると、0-2 時間における温度分布の形成には、試料内部からの水蒸気移動が寄与していると考えられる。(熱物性値が測定されているので熱伝導だけによる温度分布の計算が可能) また、3 時間以降の温度勾配の逆転する位置は試料内部の蒸発面の位置(蒸発前線)に相当するものと思われる。すなわち、蒸発前線上部は十分に乾燥し、蒸発前線下部から上昇してくる水蒸気の流路となっているのだろう。

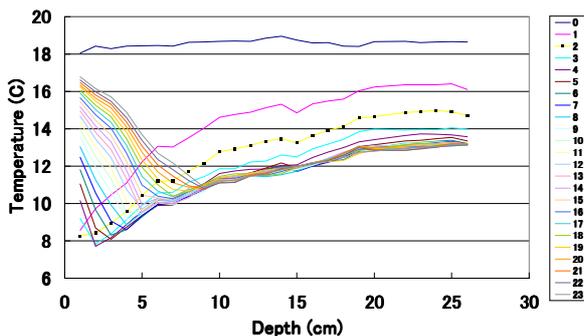


Fig.5 Temperature profiles as a function of depth in 5 % sand column.

(3) 水分量の時間変化

Fig.6 は初期含水比 5%の試料に対する水分量指標の時間変化である。15cm と 25cm の水分量指標は直線的に低下し 24 時間で 0.96 になったのに対し、5cm の水分量は 10-15 時間で急激に低下し、18 時間以降では一定の水分量(約 0.88)に収束する傾向を示した。

温度が各深さの点情報であるのに対し水分計が深さ 3cm 幅の領域情報であることを考慮すると、10-15 時間における 5cm 深の水分量の急激な低下は、この時間帯に蒸発面が 3.5-6.5cm を通過したことを意味する。これは、温度変化(Fig.4 や Fig.5)から推定した 5cm おける蒸発面の通過時間(14 時間くらい)と一致する。また、15cm や 25cm の水分量指標が低下していることから、試料内部からも水分が失われていることがわかる。これは初期含水比 5%では蒸発面のかなり下部からも水蒸気が移動しているためと思われるが、これら一連

のメカニズムは初期含水比の異なる試料に対する温度分布と水分量の実験結果と比較することによってより明確になるであろう。

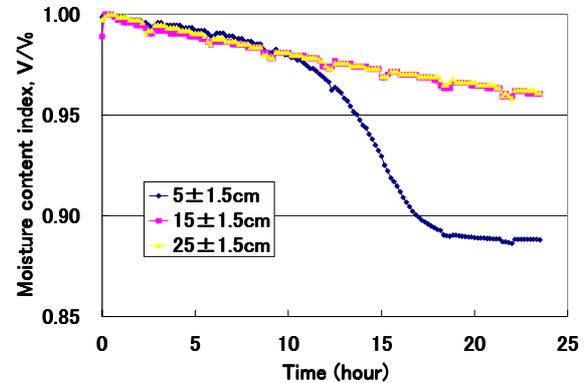


Fig.6 Moisture content index as a function of time in 5 % sand column.

4. おわりに

本研究では実験室内で減圧過程における砂カラム中の温度と水分量の変化を実測している(現在継続中)。現時点で得られたデータだけでも、減圧過程で蒸発面が砂中を移動していくことや砂中深部から水分が失われる実態が明らかになりつつある。こうした知見が実験的に検証される意義は大きいと思われる。

本研究のような宇宙環境を想定した多孔質体中の水分と熱の移動に関する実験的研究の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:火星に生命体!?, *土壌の物理性*, vol.74, pp.33(1996)
- 3) 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)
- 4) 遠藤明・登尾浩助:サーモTDRプローブによる土壌の体積熱容量・熱伝導率と水分量の測定, *農業土木学会講演要旨集*, pp.182-183 (2001)
- 5) C. S. Campbell: Response of the ECH₂O Soil Moisture Probe to Variation in Water Content, Soil Type, and Solution Electrical Conductivity, DECAGON Application Note, <http://decagon.com/echo/> (2001)