

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

東大農 溝口 勝 ・ 岩手大農 登尾浩助

Moisture transport in porous media under low temperature, low pressure and small gravity conditions

Masaru Mizoguchi * and Kosuke Noborio **

* 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: mechanism of water cycle in a planet, environmental control of plant, construction of a base on a planet. Since space has a different environment from the earth, however, laws of moisture transport on the earth may not be valid in space. For example, since interaction between solid surface and water is dominant rather than gravity under low temperature, low pressure and small gravity conditions, the specific mechanism, such as sublimation from ice to vapor, transport by vapor phase and condensation from vapor to liquid phase, will be more important in space than in the earth. In this study, we have measured changes in temperature in sand columns to understand phenomena of phase transition and transport of water in porous media under low pressure. As a result, we found that sand froze due to evaporation depending on its water content. The result shows that water can exist as ice in the ground of a planet under low pressure. We need more experiments to measure water movement in the frozen sand.

Keywords; Moisture transport, Porous media, Low pressure, Low temperature, Frozen soil

1. はじめに

宇宙利用 - 地球と環境の異なる惑星の利用 - を考えるとき、多孔質体中における水分移動は水文学的、農学的、土木工学的に重要な研究テーマである。例えば、最近発見された火星表面の湖跡¹⁾や侵食模様の成因を解明するためには火星地中における水循環を明らかにする必要がある。多孔質体中の水分移動の特性を知ることは宇宙空間における植物の生育環境を調節する上で重要になる。惑星地上に宇宙基地を建設する際には宇宙環境下での土質工学が必要になる。さらには、人間が排出する有機性廃棄物の効率的な処理方法として微生物を利用することを想定した場合、バイオリアクターとして多孔質体中の水分移動特性を知る必要がある。

これまで多孔質体中における水分移動は土質力学分野で Darcy の法則に基づいた間隙が水で飽和した液状水の移動論が発展してきた。また、土壌物理学分野では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なども形成されてきた。こうした多孔質体中にお

ける水分移動は微分方程式を用いて物理的に厳密に記述されているものの、あくまでも地球上で起こる現象を表現したものであり、これらの法則が宇宙環境下でも成立するのかどうかは誰も検証していない²⁾。

仮に地球と異なる環境を低温・低圧・微重力という条件に想定してみると、地球の重力下で観察されてきた多孔質体中の水分移動現象は、固体表面と水分子との相互作用が支配的になるために、氷から水蒸気への昇華・水蒸気による移動・水蒸気凝縮過程が重要になると考えられる。将来的に本研究では低温・低圧・微重力という各条件の影響を把握する目標を持っているが、初年度の今年度は地上の実験室で低圧条件下の砂カラム中における水の形態変化とその移動の実態を把握することにした。本論文ではその実験の概要を述べ、宇宙利用における多孔質体中における水分移動に関する研究の重要性を指摘する。

2. 実験方法

(1) 試料 土質力学分野で標準試料として使われる豊浦砂を用いた。

(2) 実験装置 2つのデュア-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)方法 試料の初期含水比(水分質量/砂質量x100)を0%, 0.5%, 6%, 10%, 20%に調整して、デュア-瓶に高さ17cmになるように充填する。試料の深さ1cm, 6cm, 11cm, 16cmの位置には温度計が埋設してある。充填試料の重量を測定した後、室温20・大気圧下のデシケータに1-2時間放置し、真空ポンプで排気してデシケータ内の圧力を下げる(Fig.1)。10~20時間排気を続けた後、試料を取り出し、排気後の重量を測定し、温度計を回収する。この方法により、試料上面だけから蒸発し、側面と底面が断熱された系が実現される。



Fig.1 Sand columns in the chamber under vacuum

3. 結果と考察

(1) 試料の状態変化

Fig.2は実験直後の水分を含んだ砂試料の様子である。試料は表面から内部まで凍結し、所々に空隙ができていた。水分を含まない試料では凍結しなかった。



Fig.2 Frozen wet-sand in the chamber under vacuum

(2) 試料中の温度変化

Fig.3は初期含水比0.5%と6%の試料中の各深さにおける温度変化である。0.5%では減圧開始後50分くらいで試料温度が18から10程度まで低下し、その後緩やかに上昇した。温度低下は表面に近い方が大きかった。それに対して6%では、1cm深さの温度が0以下になり、50分の時点で-3から-2.3に瞬間的に上昇した後緩やかに低下し、170分~260分では-7の一定温度を保った。瞬間的な温度上昇は過冷却が破れて凍結が開始したためであろう。一定温度を保つ時間帯は6cm以下の深さでも観察された。このように試料中の温度が一定に保たれるのは気化熱による熱損失と凍結による融解熱が各深さでバランスしているためである。

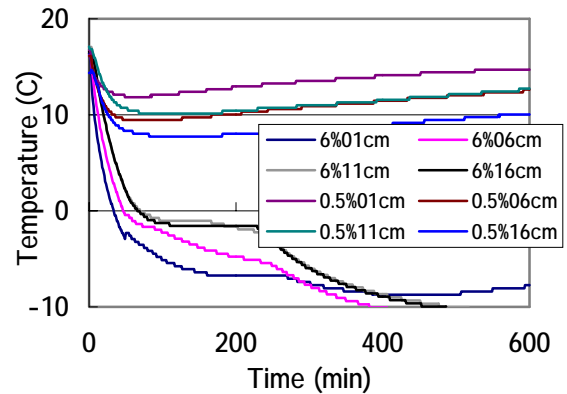


Fig.3 Temperature as a function of time in 0.5 % and 6 % sand-columns

(3) 温度変化に与える含水比の影響

Fig.4は異なる初期含水比試料の11cm深さの温度を比較したものである。0.5%では温度が10までしか低下しなかったが、6%以上では0以下になり、ある時間帯でおよそ-1の一定温度になり、その後再び温度が低下した。

地球上の大気圧下にある土中水は、土壌水分量に対応して凝固点降下が生じることが知られている。固液平衡を仮定すると、その関係は次式で表される³⁾。

$$pF = 4.1 + \log |T|$$

ここで T は凝固点降下度、pF は土壌水分のエネルギー状態を表す指標である。大気圧下であれば T=-1 の時の pF は 4.1 となるが、これは今回用いた砂であれば含水比 6%以下の水分量に相当し、上式が適用できないことを示している。つまり、Fig.4 に示された -1 という凝固点降下は低下下では水の固液平衡ではなく固気平衡を仮定した土中水の凝固点降下式を新たに考える必要があることを示唆している。

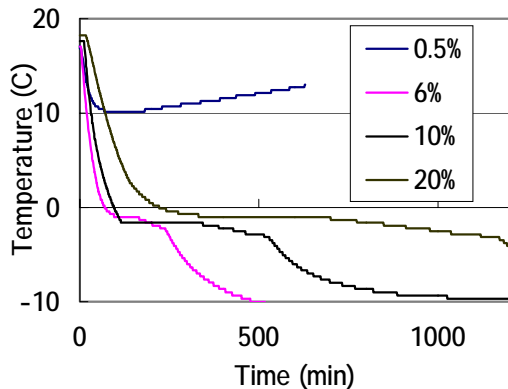


Fig.4 Temperature at the depth of 11 cm for the sand column with different initial water content

また、一定温度を保つ時間は含水比が高い方が長かった。これは水分が多い試料ほど凍結する水分量が多いことによる。一定温度を保った後も温度が低下するのは、上部で凍結した試料から水が氷から水蒸気に相変化するとき昇華熱を奪うためであろう。この仮定が正しいとすれば、間隙が水分で飽和した試料よりも適度に空隙を残した試料の方が昇華面は広く、水蒸気も間隙中を移動しやすいので、温度低下が大きくなることが予想される。この点については、予め凍結した試料によって同様の実験をして検証する必要がある。

火星の地下で水分がどのような状態でどれくらいの飽和度で存在しているのかはわからないが、いずれにせよ、不飽和状態の多孔質体中の水分移動は温度環境を決定する上でも重要なファクターであろう。

(4) 蒸発量と初期含水比の関係

Fig.5 は実験前後における試料重量の減少量と初期含水比の関係である。実験中デシケータ内は

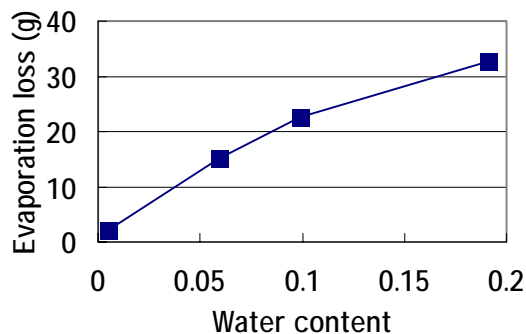


Fig.5 Evaporation loss vs. water content

ほぼ真空に保たれているので、重量の減少は試料からの水分蒸発による。したがって、この図は水分を多く含む試料の方が蒸発量が多いことを示す。

ここで蒸発熱に伴う試料温度の変化を以下の数値を使って推算してみる。

含水比=0.1 (10%), 充填体積=500 cm³, 充填した質量=750g (砂 682g, 水 68g), 蒸発量=22g, 砂粒子の比重=2.65, 試料の初期温度=20

これらの値から(固相率)=0.51, (含水率)=0.14 また、水の蒸発および凍結の潜熱を 540cal/g および 80cal/g とし、水を含んだ砂の体積熱容量を次式⁴⁾で近似すると、

$$C = 0.5 \times (\text{固相率}) + (\text{含水率}) \quad [\text{cal/cm}^3/\text{deg}]$$

10%含水比の砂に対して C=0.4 を得る。

簡単のために C は実験中一定と仮定すると、蒸発による熱損失が 540 x 22 = 11880 cal なので、最終的な試料温度 T は

$$(\text{蒸発熱}) = (\text{温度変化の熱量}) + (\text{凍結潜熱})$$

$$11880 = 0.4 \times 500 \times (20 - T) + (68 - 22) \times 80$$

より、T = -21 となる。

この値は Fig.4 で得られた-10 よりも低い。詳細な考察のためには蒸発速度の時間変化も考慮する必要があるが、試料容器の側面からの実際の熱損失などを考えれば推算値はそれなりに妥当な値であろう。いずれにせよ、水の状態変化や水分移動形態も含めて低温・低圧環境下の多孔質体の水分移動に関してはさらに詳細な検討が必要である。

4. おわりに

地球と異なる環境(低温・低圧・微重力)では、固体表面と水分子との相互作用が支配的になり、氷から水蒸気への昇華・水蒸気による移動・水蒸気凝縮過程が重要になると考えられる。そこで、本研究では地球上の実験室内で低圧条件下の砂カラム中における温度変化を実測し、水の形態変化と移動の実態について考察した。まだ予備実験を開始した段階であるが、宇宙環境下における多孔質体中の水分移動の解明は惑星地中における水循環・植物の生育環境調節・基地建設の設計などに貢献できそうなことを十分予感させる。

参考文献

- 1) 火星にかつて多数の湖存在か, 2000年12月5日 NIKKEI NET
- 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: 土壌の水分特性, 膨潤, 凝固点降下についての熱力学的考察, 土壌の物理性, 68, pp.51-55(1993)
- 4) 八幡敏雄: 土壌の物理, 東京大学出版会, p.131(1980)