

微小重力下における多孔質体中の浸潤初期の水分移動速度

佐藤 直人（明治大），登尾 浩助（明治大），丸尾 裕一（明治大）

Water Imbibition rate through porous media in the early stage of imbibition under microgravity

Naoto Sato*, Kosuke Noborio**, Yuichi Maruo*

*Graduate School of Agriculture, Meiji University, Kawasaki, Kanagawa 214-8571

**School of Agriculture, Meiji University, Kawasaki, Kanagawa 214-8571

E-Mail: n_sato@meiji.ac.jp

Abstract: It is reported that under microgravity water imbibition rates in porous media are smaller than theoretical values. It is hypothesized that air-trapped pores formed behind the wetting front decrease water permeability and result in sluggish flow. In this study, we observed vertical water flow in porous media under microgravity during the extremely early stage of imbibition. Without trapped air behind the wetting front, water imbibition rates agreed well with theoretical values. Even under microgravity, we observed a water jump phenomenon in which certain empty pores were suddenly filled with imbibed water.

Key words: Space agriculture, water movement, porous media

1. はじめに

宇宙船や月・火星などの宇宙空間において土耕栽培を行うために、作物に対する水分供給方法の検討を行う必要がある。水分供給方法を検討するためには、それぞれの重力環境下における多孔質体中の水分挙動を把握する必要がある。不飽和多孔質体中の水分移動はリチャーズ式(式[1])によって表される¹⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right) \quad [1]$$

ここで、 ψ はマトリックポテンシャル(Pa)、 t は時間(s)、 θ は体積含水率(m^3/m^3)、 $K(\theta)$ は不飽和透水係数(m/s)、 x は水平方向の距離(m)、 z は垂直方向の距離(m)、 ϕ は重力ポテンシャル(Pa)である。ところが、微小重力下においては浸潤速度が理論値より低下することが報告された²⁾。浸潤速度が低下した原因として、浸潤領域に気相が保持されたことで透水性が低下した可能性が指摘されている³⁾。本研究では、気相の保持がほとんど発生していない期間、すなわち、浸潤の極めて初期における浸潤速度を測定し、理論値との比較を行った。

2. 実験方法

落下塔を用いた微小重力実験を行った。落下塔には北海道赤平市にあるコスモトーレ (HASTIC) を使用し、2.8秒程度の微小重力環境を得た。多孔質体(粒径1mmおよび2mmのガラスビーズ(GB))を鉛直に設置したカラム(内径24mm、長さ200mm)に充填した(Fig. 1)。多孔質体は中性洗剤で洗浄後、風乾したものを用いた。粒子密度 ρ_s は 2.49 Mg/m^3 であり、乾燥密度 ρ_b は 1.56 Mg/m^3 に調整し充填した。浸潤溶液には蒸留水を用いた。ガラスビーズと蒸留水

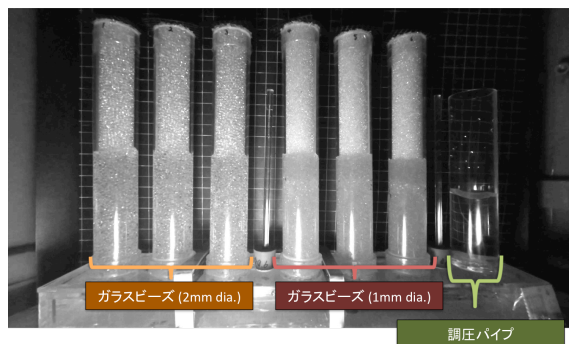


Fig. 1 実験装置図

の接触角 α は2mmGBでは 0.384° 、1mmGBでは 0.911° であった。1G下で水位が安定したのを確認した後、45mの高さから実験装置が入ったカプセルを落下させ、ガラスビーズ内の水位変化をビデオカメラを用いて撮影した。得られた映像は画像解析ソフトImageJ(<http://rsb.info.nih.gov/ij/>)を用いて画像解析を行い、経時的な水位の変化を調べた。

浸潤速度の理論値はWashburn's equation(式[2])を用いて求めた。Washburn's equationによれば、重力勾配を無視できる環境下において、多孔質体の一端から水分浸潤をさせていくとき、浸潤距離 L と経過時間 t の関係は次のように表される⁴⁾。

$$L = \sqrt{\frac{\sigma r \cos \alpha}{2\mu} t} \quad [2]$$

ここで σ は表面張力(N/m)、 r は代表間隙径(m)、 α は接触角、 μ は液体の粘性率(Pa*s)である。

3. 結果と考察

経過時間と浸潤距離の関係を Fig. 2 に示す。実線（黒）は G データ、実線（赤: 2mmGB、青: 1mmGB）が理論値、プロット（赤: 2mmGB、青: 1mmGB）が実測値である。どちらの試料においても、微小重力下において鉛直上方浸潤が観察されたが、特に 1mmGB において実測値が理論値とよく一致した。2mmGB の水分上昇速度は浸潤前半 (0 s - 1.2 s) において理論値よりも小さい値であったが、浸潤後半 (1.7 s - 2.7 s) において瞬時に水分上昇が起こる“ジャンプ”と呼ばれる現象が確認され、浸潤距離が理論値と一致した。ジャンプとは Lu ら⁵⁾によって 1G 下において確認された瞬間的な粒子の取り込みによる水分移動である。微小重力下において 2mmGB で確認された“ジャンプ”の様子を Fig. 3 に示す。1.5 s から 1.6 s の間では水位の変化がほとんど見られなかったのに対して、その直後の 0.1 s の間に瞬間的な水分上昇が起こったことが分かる。Lu ら⁵⁾は特に初期乾燥状態において、流体が間隙のくびれを通過する際に“ジャンプ”による水分移動が起こると報告しており、また“ジャンプ”による粒子の取り込みは、隣接する粒子の中で小さいものから選択的に起こると述べている。以上の結果から、気相の保持が発生していない浸潤初期では水分浸潤速度は理論値と一致すること、また微小重力下においても粒径が大きい多孔質体ではジャンプによる水分移動が起こることが明らかになった。

謝辞

本研究の一部は、科研費（挑戦的萌芽研究，課題番号：26660192）の助成により実施した。

参考文献

- 1) Richards, L. A.; Capillary conduction of liquids through porous mediums: Physics, 1.5, pp. 318-333, 1931.
- 2) Jones, S. B., and Or, D.; Microgravity effects on water flow and distribution in unsaturated porous media: Analyses of flight experiments: Water resources research, 35.4, pp. 929-942, 1999.
- 3) Or, D., Tuller, M., and Jones, S. B.; Liquid behavior in partially saturated porous media under variable gravity: Soil Science Society of America J., 73.2, pp. 341-350, 2009.
- 4) Washburn, E. W.; The Dynamics of capillary flow: Physical review, 17.3, pp. 273-283, 1921.
- 5) Lu T. X., Biggar, J. W., and Nielsen, D. R.; Water movement in glass bead porous media: 1. Experiments of capillary rise and hysteresis: Water Resources Research, 30.12, pp. 3275-3281, 1994.
- 6) 佐藤直人, 登尾浩助, 丸尾裕一, 名倉理紗, 上出綾; μ G と 1G 条件下における多孔質体への水分浸潤: Space Utilization Res., 30, 2016.

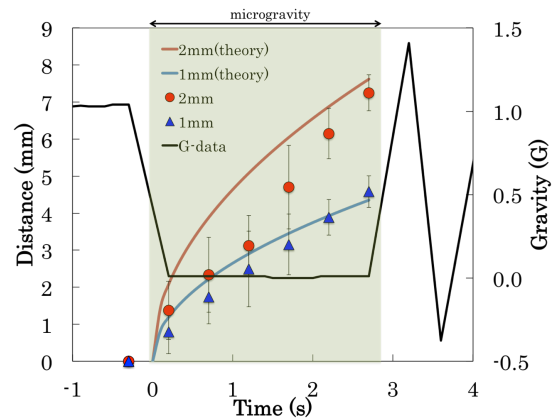


Fig. 2 経過時間と浸潤距離の関係

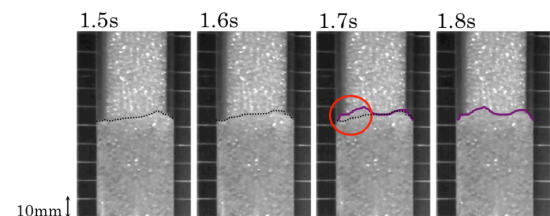


Fig. 3 2mmGB で確認された“ジャンプ”の様子