

# 多孔質体中の浸潤速度と重力の関係

佐藤 直人 (明大・院), 長沼 菜摘 (明大・院), 野川 健人 (明大・学), 丸尾 裕一 (明大・院), 登尾 浩助 (明大)

## Effects of gravity on water infiltration rate in porous media

Naoto Sato\*, Natsumi Naganuma, Kento Nogawa, Yuichi Maruo, and Kosuke Noborio

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

E-Mail: n\_sato@meiji.ac.jp

Abstract: To extend the living environments of human in the solar system, it is necessary to understand the water circulation in extraterrestrials. Under the 1G condition, water flow in porous media is expressed by Richards equation, meaning that water moves only by a matric potential gradient when there are no pressure and gravitational potentials. Under microgravity conditions, however, water behavior in porous media is still not well understood. In this study, we conducted parabolic flight experiments and observed water infiltration in porous media under microgravity. The imbibition rate under microgravity was slightly smaller than the horizontal infiltration rate under the 1G condition.

Key words; Soil physics, Water movement, Porous media, Microgravity

### 1. はじめに

近年, 月や火星において水が存在する証拠の発見が相次いでいる<sup>1)2)</sup>. 月や火星の水資源は将来の有人探査の現場資源としての利用が期待されており<sup>1)</sup>, それらの水が多孔質体中にどのように存在し, どのように利用することができるのかを明らかにする必要がある. 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<sup>3)</sup>.

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

ここで  $\theta$  は体積含水率,  $t$  は時間,  $z$  は距離,  $K$  は透水係数, およびはマトリックポテンシャル勾配および重力勾配である. 式[1]において水分移動の駆動力は多孔質体中のマトリックポテンシャル勾配および重力勾配である. 特に水平浸潤のみを考えるとときには重力勾配を無視できるため, 水分移動はマトリックポテンシャル勾配のみを駆動力として式[2]のように表される.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad [2]$$

多孔質体中の水平浸潤と同様に, 微小重力 ( $\mu\text{G}$ ) 下においても多孔質体中の重力勾配は無視できると考えられ, 水分移動は式[2]によって表される. したがって水平浸潤は  $\mu\text{G}$  下における水分移動を適切に模擬できると考えられた<sup>4)</sup>. ところが, Yendler ら<sup>4)</sup>が 1.5 mm のガラスビーズを用いて  $\mu\text{G}$  下における浸潤を 1G 下における水平浸潤と比較したところ,  $\mu\text{G}$  下の浸潤速度が水平浸潤速度と比較して小さくなること明らかになった. 浸潤のしやすさを表す指標であるソーブティビティ  $S_p$  は 1G 下では 2.5 cm/min<sup>0.5</sup>,  $\mu\text{G}$  下では 0.8 cm/min<sup>0.5</sup> であり, 68%低下した. その

ため  $\mu\text{G}$  下における現在の水分挙動モデルの適用性が疑問視されている<sup>5)</sup>が,  $\mu\text{G}$  下において多孔質体中の水分移動を調査した例は少なく, より多くの  $\mu\text{G}$  実験の必要性が指摘されている<sup>4)</sup>. 本研究ではパラボリックフライトによる  $\mu\text{G}$  下において浸潤実験を行い, 多孔質体中の水分移動の重力依存性と現在の水分移動理論の適用性について検討した.

### 2. 実験方法

パラボリックフライトによる  $\mu\text{G}$  実験を行なった. 本実験では航空機として MU-300 (Diamond Air Service Co., Ltd., Nagoya, Japan) を使用した. 1パラボリックフライト (PF) の  $\mu\text{G}$  継続時間は 18 秒~20 秒程度で, 3 回の  $\mu\text{G}$  環境を作出し実験を行なった. 獲得した  $\mu\text{G}$  環境下において多孔質体への浸潤実験を行なった.

多孔質体への浸潤速度は粒度に非常に敏感である<sup>6)</sup>. 間隙径が小さいほど重力の影響は小さくなること明らかになっており<sup>7)</sup>, 比較的粗い粒度の媒体では, 薄く敷いた多孔質体の水平浸潤実験 (静水圧の影響を低減する実験) でさえ, 重力勾配により浸潤が速くなる可能性がある<sup>5)</sup>. そこで Yendler ら<sup>4)</sup>が用いたガラスビーズ (粒径 1.5 mm) よりも小さい 0.4 mm のガラスビーズを用いて,  $\mu\text{G}$  下における水分浸潤を観察した. 浸潤速度は接触角の変化に大きく影響を受けるため, ガラスビーズ表面の処理には特に気をつける必要がある. ガラスビーズは Lu ら<sup>8)</sup>の方法に則り, 実験前に中性洗剤 (0.75 ml/L) で洗浄し蒸留水で 10 回すすぎ洗いを行なった後に 110°C で炉乾燥した. 炉乾燥したガラスビーズを密閉可能なプラスチックバック内で室温まで冷やしたのち実験に使用した.

ガラスビーズを鉛直に設置したアクリル円筒カラム（内径 2.4 cm, 高さ 13.6 cm）に充填した。乾燥密度は  $1.59 \text{ g/cm}^3$  であった。水源は直径 3.0 cm の円筒アクリル管を用いて作成した。水源の上部は電磁弁で閉じられており、実験中に任意のタイミングで手元のスイッチにより開閉できるようにした。パラボリックフライトでは  $\mu\text{G}$  の前後において 1.5G から 2G 程度の過重力環境となるため、 $\mu\text{G}$  以外の重力環境では電磁弁を閉じ水源を密閉することで浸潤を停止させた。多孔質体カラムを鉛直に設置し、水源と接続した。実験装置図を Fig. 1 に示す。

多孔質体中の水位の変化はビデオカメラ（GoPro Hero5, GoPro 社）で撮影した。得られた動画から抽出した画像を解析し、浸潤速度を計算した。

### 3. 結果

$\mu\text{G}$  下における浸潤（PF1:青四角, PF2:緑菱形, PF3:赤三角）および 1G 下における水平浸潤（白丸）の結果を Fig. 2 に示す。横軸は時間の平方根  $t^{0.5}$ 、縦軸は積算浸潤量  $I$  を示している。式[3]<sup>9)</sup>を用いて  $S_p$  を算出した。本実験における  $S_p$  は、1G 下では  $3.06 \text{ cm/min}^{0.5}$ 、 $\mu\text{G}$  下では  $2.63 \text{ cm/min}^{0.5}$  であり、14%程度低下した。

$$I = S_p t^{0.5} \quad [3]$$

この低下量は 68%低下した Yendler ら<sup>4)</sup>の結果を大きく下回った。本実験の結果は、 $\mu\text{G}$  下における浸潤速度の低下量には粒径、すなわち間隙径が大きく関わっていることを示唆しており、今後より多くの粒径について実験を行う必要がある。

### 4. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費（#17H06251）の助成を受けたものある。本研究はダイヤモンドエアサービス株式会社の支援を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) Li, S., P. G. Lucey, R. E. Milliken, P. O. Hayne, E. Fisher, J. P. Williams, D. M. Hurley, and R. C. Elphic; Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, P. Natl. A. Sci. USA. 115(36), pp. 8907-8912 (2018).
- 2) Orosei, R., S. E. Lauro, E. Pettinelli, A. Cicchetti, M. Coradini, B. Cosciotti, F. D. Paolo, E. Flamini, E. Mattei, M. Pajola, F. Soldovieri, M. Cartacci, F. Cassenti, A. Frigeri, S. Giuppi, R. Martufi, A. Masdea, G. Mitri, C. Nenna, R. Noschese, M. Restano, and R. Seu; Radar evidence of subglacial liquid water on Mars, Science, 361(6401), pp. 490-493 (2018).
- 3) Richards, L. A.; Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, 1(5), pp. 318-333 (1931).

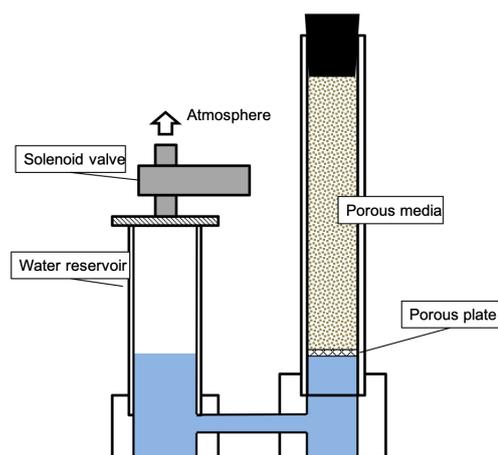


Fig. 1 Experimental apparatus for  $\mu\text{g}$  experiment.

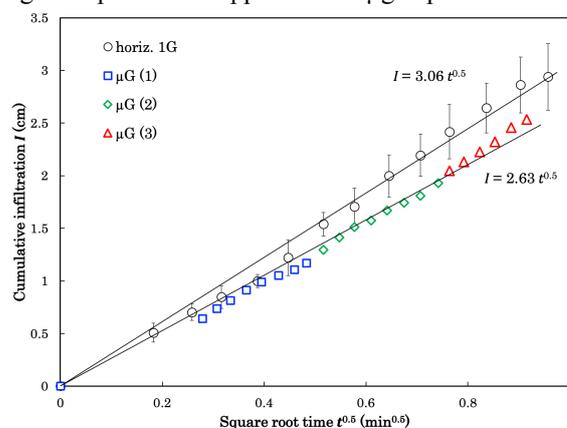


Fig. 2 Infiltration rate under various gravity conditions.

- 4) Yendler, B. S., B. Webbon, I. Podolski, and R. J. Bula; Capillary movement of liquid in granular beds in microgravity, Advances in Space Research, 18(4/5) pp. 233-237 (1996).
- 5) Jones, S. B. and D. Or; Microgravity effects on water flow and distribution in unsaturated porous media: Analyses of flight experiments, Water resources research. 35(4) pp.929-942 (1999).
- 6) Yendler, B., and B. Webbon; Capillary movement of liquid in granular beds, SAE Technical Paper, 932164 (1993).
- 7) Or D., M. Tuller, and S.B. Jones; Liquid behavior in partially saturated porous media under variable gravity, Soil Sci. Soc. Am. J., 73(2) pp. 341-350 (2009).
- 8) Lu, T. X., J.W. Biggar, and D.R. Nielsen; Water movement in glass bead porous media: 1. Experiments of capillary rise and hysteresis, Water Resources Research, 30(12) pp. 3275-3281 (1994).
- 9) Philip, J. R; The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution, Soil science, 83(5) pp. 345-358 (1957).