

μG と 1G 条件下における多孔質体への水分浸潤

佐藤 直人 (明治大), 登尾 浩助 (明治大), 丸尾 裕一 (明治大), 名倉 理紗 (明治大),
上出 稜 (明治大)

Water infiltration into porous media under μG and 1G

Naoto Sato*, Kosuke Noborio, Yuichi Maruo, Risa Nagura, Ryo Kamide

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

E-Mail: cf40208@meiji.ac.jp

Abstract: For establishing space agriculture and understanding water movement in planets, satellites and comets, revealing water behavior in porous media under variable gravities is needed. We evaluated whether the theories of water movement under 1G were applicable under μG . The capillary rise theory was found to be true under μG . The horizontal infiltration theory, however, failed under μG . Water infiltration into porous media under μG seemed to be different from that under 1G.

Key words; Space agriculture, water movement, porous media

1. はじめに

2030 年代には火星の有人探査を実現することを長期的な宇宙探査目標¹⁾とすることが、国際宇宙探査ロードマップにおいて示されている。このような月や火星を目標とした長期有人宇宙探査ミッションの実現のためには、様々な生命維持システムの構築が必要であるが、宇宙空間における作物栽培を可能とする「宇宙農業」もその一つである。地球とは異なる重力環境下において土耕栽培を行うためには、土などの多孔質体中における水分挙動を解明する必要がある。

不飽和多孔質体中の鉛直方向の水分フラックスはバッキンガム-ダルシー式によって表される。

$$q = -k(\varphi_m) \left(\frac{d\varphi_m}{dz} + 1 \right) \quad (1)$$

ここで q は水分フラックス、 $k(\varphi_m)$ は不飽和透水係数、 φ_m はマトリックポテンシャル、右辺カッコ内第二項は重力勾配を表す。水分の駆動力はマトリックポテンシャル勾配および重力勾配である。一方で水平方向の水分フラックスでは、重力勾配が存在しないため、(1)式における重力項の影響が無視できる。したがって(1)式は、

$$q = -k(\varphi_m) \left(\frac{d\varphi_m}{dz} \right) \quad (2)$$

と書くことができる。従って水平流れであれば、どのような重力条件下においても(2)式は成り立つはずである。

ところが、Jones ら²⁾は空隙中で水分が保持される様子が変化する可能性を述べ、地上におけるフラックスモデルの適用性を疑問視した。また Bingham ら³⁾は、ロシアのミールにて行われた植物栽培実験の媒体中の透水係数が不連続であったことを報告し、 μG では多孔質体中の水分挙動が異なる可能性を述べた。Heinse ら⁴⁾が微小重力環境下において多孔質体の水分特性を明らかにするためにに行った実験では、 μG においてマトリックポテ

ンシヤルが理論値よりも小さい値となった。我々はこの結果から μG においては多孔質体中にマトリックポテンシャル勾配が生じにくいのではないかと考えた。従って μG 下では 1G 下に比べて水分浸潤が小さくなる可能性がある。そこで本研究では、地上における水分浸潤理論は μG 下においても適用できるのかを明らかにする事を目的とした。

2. 毛管上昇理論の適用性

多孔質体は様々な孔径の毛細管の集まりと仮定することができる(図1)。土が水を吸う力は主に毛管力によるものである。毛管上昇高 h (m) は次のように表される。

$$h = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho g r} \quad (3)$$

ここで σ は表面張力 (N/m)、 α は接触角、 ρ は液体の密度 (kg/m^3)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 r は毛管半径 (m) である。重力加速度は分母にあり、毛管上昇高が重力加速度に反比例することが分かる。こ

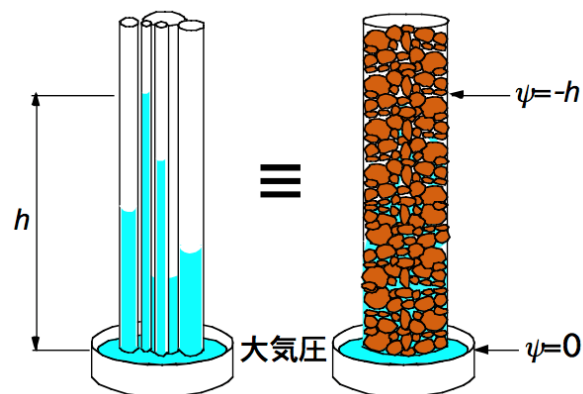


図1 毛管上昇と多孔質体中の水⁵⁾

の式が μG においても成り立つ事を確かめるため、パラボリックフライトによる μG 実験を行った。航空機 (MU-300) を使用し、20 秒程度の μG 環境を得た。内径 0.4 mm から 0.6 mm の毛細管の下端が水に浸かるように水源に設置し、毛管上昇の高さの変化をビデオカメラによって記録した。

図 2 に結果を示す。実線は G データ、破線は重力加速度を (3) 式に代入して計算した毛管上昇高の理論値、プロットが毛管上昇高の実測値である。ただし理論値は最大値を毛管長さの 144 mm としている。過重力下においても微小重力下においても実測値が理論値と一致したところで安定した。この結果から通直な毛細管であれば、毛管上昇理論は μG においても成り立つ事が確かめられた。

しかし、土などの多孔質体は粒子の集まりであり、間隙は屈曲して複雑な 3 次元の網目状である。 μG において、そのような構造を持つ多孔質体内では、粒子の凸曲面に沿うような水分移動が起こりにくい可能性が報告されている⁷⁾。そこで、より複雑な流路を持つ毛細管において毛管上昇がどのような挙動を示すのかを確かめる実験を行った。落下塔コスモトローレ (HASTIC) を利用し 2 秒ほどの μG 環境を得た。毛細管には、①屈曲したもの (図 3)、②内径の異なる管を接続したもの (図 4) を使用した。毛細管の下端が水源に浸かるように設置し、毛細管内の水位の変化をビデオカメラによって記録した。

水位変化の結果を図 3, 4 に示す。矢印が水位を示している。屈曲毛細管では、落下開始 1.3 秒後には管上端まで水位が上昇した (図 3)。また $\phi 0.8$ mm の管の上に $\phi 2.2$ mm の管を接続した毛管では水位が上端まで上昇した一方で、 $\phi 2.2$ mm の管の上に $\phi 0.8$ mm の管を接続した毛管では、その水位は繋ぎ目までしか上昇しなかった (図 4)。

以上の毛管上昇実験により、毛管上昇理論は μG においても適用可能であるが、毛管上昇が途切れてしまう流路の形状が存在することが明らかになった。

3. 水平浸潤理論の適用性

多孔質体を水平に設置し一端から水分浸潤をさせていくとき、その浸潤距離 L と経過時間 t の関係は次のように表される⁸⁾。

$$L = \sqrt{\frac{\sigma r \cos \alpha}{2\mu} t} \quad (4)$$

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。この式も多孔質体を毛細管の集まりとする仮定 (図 1) の元に考えられた式である。重力項は無く、水平浸潤速度は 1G においても μG においても変化しないことが予想される。この事を確かめるためにパラボリックフライトによる μG 実験を行った。豊浦砂を充填し

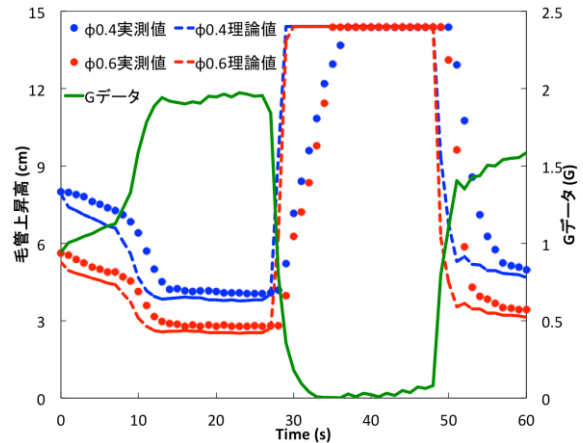


図 2 毛管上昇高の変化と G データ⁶⁾

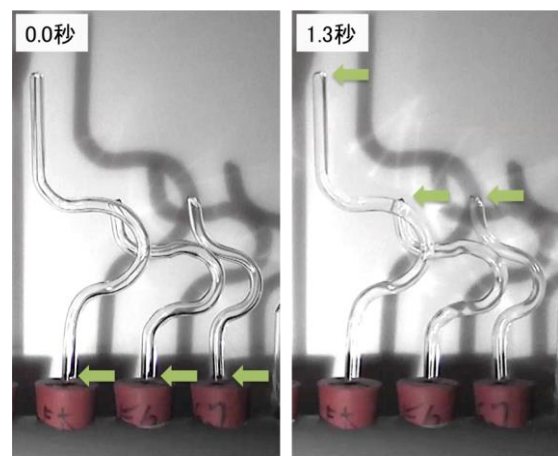


図 3 屈曲毛細管内の水位変化

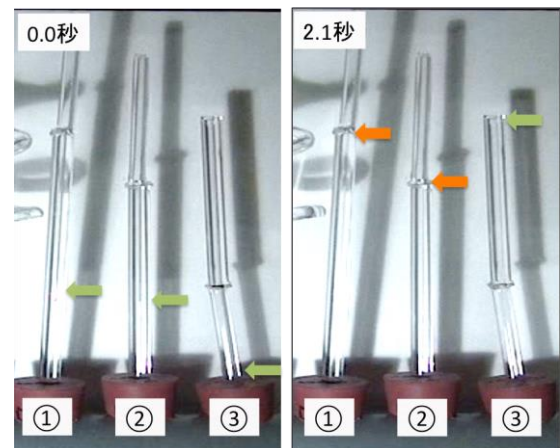


図 4 内径の異なる管を接続した毛細管内の水位変化; ①②: 上 $\phi 2.2$ mm, 下 $\phi 0.8$ mm, ③: 上 $\phi 0.8$ mm, 下 $\phi 2.2$ mm

たカラムを水平に設置した。はじめの 8 秒間はポンプによる注水を行い、水を砂に接触させた。その後、ポンプによる注水を止め、水源バッグから水を吸わせた。1G および μG 下において実験を行い、浸潤速度を比較した。

図 5 に結果を示す。赤いプロットは 1G、青いプロ

ットは μG における浸潤距離と経過時間の関係である。1Gにおいては時間の経過とともに多孔質体が水を吸水していき、注水開始から23秒後には浸潤距離が30 mmに到達した。一方で μG では浸潤が著しく低下した。1Gと μG で水平浸潤速度が変化したことから μG においては(4)式が適用できない可能性がある。

4. まとめと展望

μG においても毛管上昇理論は成立した一方で、水分浸潤理論は適用できない可能性が明らかになった。したがって、多孔質体を毛細管の集合体として扱ってきた地上における水分浸潤理論は見直される必要がある。

多孔質体中の水分挙動を表す理論の構築は、その多孔質体の保水性や透水性といった特性を計算する上で大変重要である。加えて様々な重力下における水分挙動理論を構築する事は、宇宙農業の実現だけではなく、惑星・衛星・彗星における水分・水蒸気・溶質移動を理解する上でも欠かすことができない。しかし、地上と異なる重力下における水分挙動理論の適用性は未だに不明な点が多く、さらに理解を深める必要がある。

5. 謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費(26660192)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) International Space Exploration Coordination Group, 国際宇宙探査ロードマップ(第2版), p. 4, 2013.
- 2) S. B. Jones and D. Or, Microgravity effects on water flow and distribution in unsaturated porous media: Analyses of flight experiments, Water Resour. Res., 35, pp. 929-942, 1999.
- 3) G. E. Bingham, S. B. Jones, D. Or, I. G. Podolski, M. A. Levinskikh, V. N. Sytchov, T. Ivanova, P. Kostov, S. Sapunova, I. Dandolov, D. B. Bubenheim, and G. Jahns, Microgravity effects on water supply and substrate properties in porous matrix root support systems, Acta Astronaut, 47, pp. 839-848, 2000.
- 4) R. Heinse, S. B. Jones, S. L. Steinberg, M. Tuller, and D. Or, Measurements and modeling of variable gravity effects on water distribution and flow in unsaturated porous media, Vadose Zone J., 6, pp. 713-724, 2007.
- 5) 登尾浩助, 溝口勝, 月・火星の大気圧ドーム型基地における作物生産の可能性, Space Utilization Res., 24, pp. 362-363, 2008.
- 6) Yuichi Maruo, Naoto Sato, Risa Nagura, Ryo Kamide, and Kosuke Noborio, Water movement in capillary tubes under microgravity, The Joint Conference of

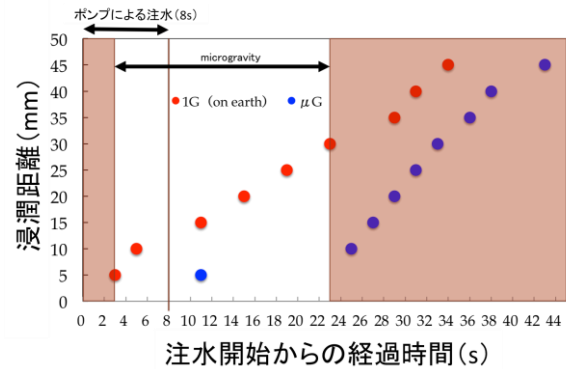


図 5 注水開始からの経過時間と浸潤距離

- 6th International Symposium on Physical Sciences in Space and 10th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Applications, Kyoto, Japan, Sep., 2014. (一部改変)
- 7) Risa Nagura, Challenges of crop Production under extraterrestrial environments, 明治大学大学院農学部農学研究科修士論文, 2015. (未発表)
 - 8) E. W. Washburn, The Physical Review. The Dynamics of capillary flow, 17, 3, pp. 273-283, 1921.