

低重力下における土耕栽培用地中点滴灌漑技術の検討

佐藤 直人 (明大), 登尾 浩助 (明大), 丸尾 裕一 (明大・院), 野川 健人 (明大・院), 長沼 菜摘 (明大・院), 塚野 真穂 (明大・学), 水谷 隼人 (明大・学), 橋本 博文 (JAXA)

Development of Subsurface Drip Irrigation Techniques for Soil Cultivation under Low Gravity

Naoto Sato*, Kosuke Noborio, Yuichi Maruo, Kento Nogawa, Natsumi Naganuma, Maho Tsukano, Hayato Mizutani, and Hirofumi Hashimoto

*Meiji University, Kawasaki, Kanagawa 214-8571

E-Mail: n_sato@meiji.ac.jp

Abstract: Space agriculture is considered as one of the sustainable life support systems for manned space exploration mission for the Moon and Mars. In the environments where resources are limited, consumption of water and fertilizers need to be minimized. Therefore, we propose a subsurface drip irrigation system as an efficient water supply method to the rhizosphere. In this study, we conducted water drainage experiments in porous media under microgravity using a drop tower in addition to numerical simulation for water infiltration in porous media under low gravity conditions. Downward infiltration decreased, whereas upward infiltration increased under low gravities. Such changes in water distribution are crucial to determine the depth of a drip point. Drainage rates did not change under 1G and microgravity, indicating that hydraulic conductivity during drainage does not depend on gravity. Since the amounts of water retrieved by negatively-pressurized drainages under low gravities became larger than those under 1G, high water use efficiency was expected under low gravity conditions.

Key words; Subsurface drip irrigation, Porous media, Infiltration, Drainage, Low gravity

1. はじめに

月面基地や火星の有人探査に必要な生命維持システムの一つとして地球圏外での持続的な食物生産を行う宇宙農業が検討されている¹⁾²⁾。サツマイモは、空間容量が限られる宇宙農場においても栽培に適した作物であると考えられており³⁾、その栽培のためには土耕栽培の実現が必要である。また、月・火星環境は資源が限られるため、作物に与える水や肥料を最小限に抑える必要がある⁴⁾。

地中点滴灌漑はチューブ等によって根圏付近に直接水分と養分を効果的に与える灌漑方法である⁵⁾。地中点滴灌漑は水資源が限られる乾燥地で発達した技術であり地表面からの蒸発による水損失を防ぐことができるため⁶⁾、灌水量はスプリンクラー等と比べて30–50%⁵⁾、地表点滴灌漑と比べても20%程度削減できることが報告されている⁶⁾。また、同時に灌水と施肥を行うことによる省力化や⁷⁾、作物の肥料利用効率が高く、ジャガイモやネギなどで増収が報告されている⁶⁾⁷⁾。これらの特徴から、地中点滴灌漑は宇宙農業に適した栽培手法である。そこで本研究では、根圏に対する効率的な水分供給法として地中点滴灌漑を提案し、低重力下における適用性の検討を行った。

2. 低重力下における浸潤過程の水分移動

地中点滴灌漑の水利用効率を高めるためには点滴ポイントの深さを適切に設定することが重要である。地表面に水が露出すると蒸発による損失が起

るため、点滴ポイントは根圏に水を均一に供給でき、かつ地表面に水が露出しないような位置に設置しなくてはならない⁶⁾。しかし、低重力下では水分の拡散が1Gと異なることが予想されるため、点滴ポイントの位置を適切に決定するためには低重力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によって水平流れについては、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-K(\theta) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial x} \right) \right) \quad [1]$$

また、鉛直流れについては

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(-K(\theta) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} + \frac{\partial \phi_g}{\partial z} \right) \right) \quad [2]$$

と表される⁸⁾。ここで θ は体積含水率(cm^3/cm^3)、 t は時間(s)、 $K(\theta)$ は透水係数(cm/s)、 x は水平方向距離(cm)、 z は垂直方向距離(cm)、 $\partial \phi_m / \partial x$ および $\partial \phi_m / \partial z$ はマトリックポテンシャル勾配、 $\partial \phi_g / \partial z$ は重力勾配である。式[1]および[2]より、水分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り、これらの圧力勾配の相互関係により多孔質体中の水分分布が決定される。マトリックポテンシャルの主な要因は毛管力であり、多孔質体中の上方向の水分移動を支配する毛管上昇高は、

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

と表される⁹⁾。式[3]より低重力下においては、上方向の水分移動は増大することが予想される。一方で、低

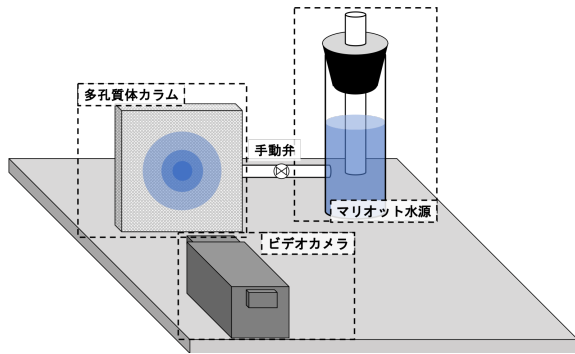


Fig. 1 浸潤実験装置図.

重力下では重力勾配が小さくなるため、重力浸潤が低下し、下方の水分移動が抑制されることが予想される。このことを確かめるため、擬似低重力下における浸潤実験を行った。

多孔質体の中央から鉛直および水平方向に進む、2次元水分移動を観察するため、Fig. 1 に示す実験装置を作製した。高さ 100 mm、幅 100 mm、厚さ 3 mm の透明アクリルカラムに、粒径 0.2 mm のガラスビーズを乾燥密度 1.53 g/cm³ で充填した。ガラスビーズは Lu ら¹⁰⁾の方法に則り、中性洗剤で洗浄後、蒸留水で 10 回すすぎ、炉乾燥したものを用いた。給水にかかる圧力を調整するため、水源にはマリョット水源を用い、手動弁を介してカラム中央に接続した。多孔質体の中央にかかる水頭圧がゼロになるように、マリョット水源のチューブ下端の高さを多孔質体中央の高さに揃えた。浸潤溶液には脱気した蒸留水を用いた。低重力環境は多孔質体カラムを傾けることにより模擬した。すなわち、重力浸潤は斜面に沿って発生することから、重力加速度の斜面方向の分力 g_s を

$$g_s = g \sin \beta \quad [4]$$

によって計算し、 $\beta = 90^\circ$ の時を 1G、 $\beta = 19.5^\circ$ の時を 1/3G、 $\beta = 9.6^\circ$ の時を 1/6G、 $\beta = 0^\circ$ の時を 0G とした。ここで、 g は重力加速度(m/s²)、 β は水平面と成す角度(°)である。各重力下における浸潤の様子はビデオカメラ(GoPro Hero 8, GoPro)によって撮影した。

擬似低重力下における浸潤実験において観察された水分分布の結果を Fig. 2 に示す。1G 下では点滴ポイントより上方に向かう浸潤速度に比べて下方に向かう浸潤速度が大きく、重力浸潤が支配的に水分分布を決定している。一方で、0G 下では重力浸潤の影響が見えなくなり、いずれの方向に対しても均等に水分移動が発生し、点滴ポイントを中心に同心円状に水分が分布した。1/3G と 1/6G の部分重力(Partial G)下では、重力が小さいほど下方浸潤が小さくなった。

Fig. 3 は式[1]および[2]で表されるリチャーズ式を汎用有限要素法プログラム FlexPDE (PDE Solutions Inc.)を用いて解き、本実験条件下における給水過程の水分分布の変化を推定した結果である。浸潤開始から 40 秒後における水分分布の計算結果はいずれの重

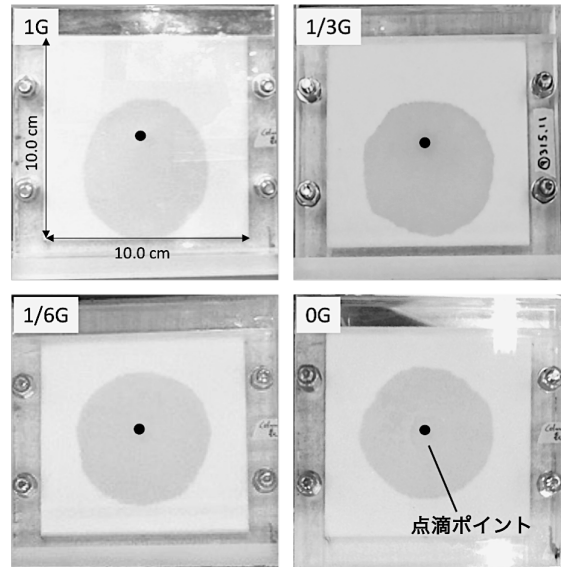


Fig. 2 浸潤開始から 40 秒後の水分分布.

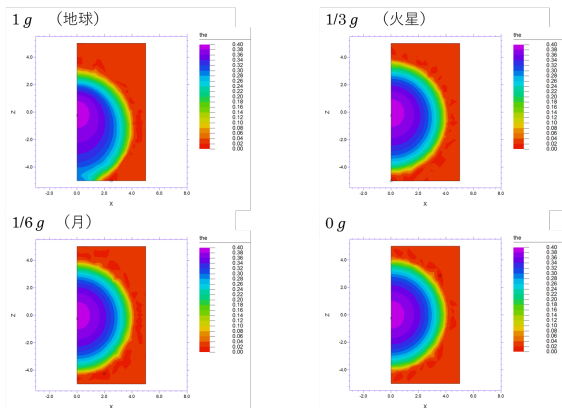


Fig. 3 低重力下における水分分布 (CFD による計算結果)

力条件下においても、実測した水分分布に一致し、擬似低重力下における水分分布は従来の水分移動理論により推定できることが明らかとなった。しかし、先行研究で、微小重力(μG)下では水分移動速度が低下することが報告されており¹¹⁾、低重力下における浸潤過程の水分分布の変化の推定にはパラボリックフライトなどによる真の低重力環境下で観察・検討を行うことが必要である。

3. 低重力下における排水過程の水分移動

浸潤過程の水分移動の観察により、低重力下では重力による排水が起こりにくく、給水した水分が根圏に留まり続けることが明らかになった。このことは、地下浸透による水分損失を小さくするという利点である一方で、栽培培地の排水性が低下するという欠点となる。栽培培地の良好な排水性は根腐れの防止¹²⁾やガス交換の促進¹³⁾のために重要であり、排水性の良い土壌では作物の根張りが良く、根圏域が拡大するため作物の増収が期待される¹⁴⁾。そのため、低重力下における地中点滴灌漑を実現するためには、

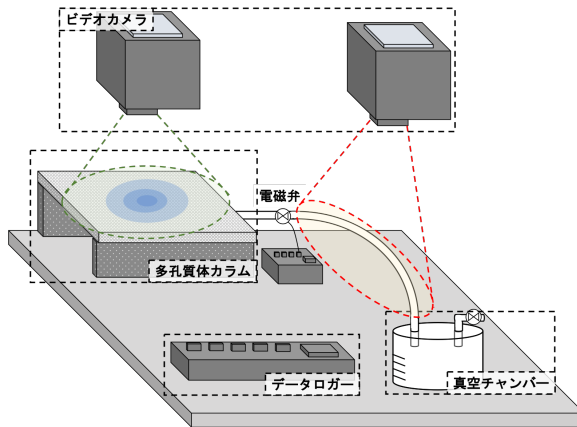


Fig. 4 排水実験装置図.

強制的に排水を行うシステムを導入する必要がある。1G 下では、多孔質体中のパイプまたはチューブに負圧をかけることにより水分量の調節を行う技術の検討が行われているが^{15) 16)}、低重力下において検討された例はない。そこで本研究では、低重力下における多孔質体中の排水挙動を明らかにすることを目的に実験を行なった。

多孔質体からの排水挙動の観察に用いた実験装置図を Fig. 4 に示す。浸潤実験と同様に、高さ 100 mm、幅 100 mm、厚さ 3 mm の透明アクリルカラムに、粒径 0.2 mm のガラスビーズを充填した。多孔質体を水平に設置し、中央から 6 ml の脱気した蒸留水をシリンジで注水した。その後、多孔質体カラムの中央と真空チャンバーを電磁弁を介して接続した。多孔質体カラムの水分挙動と、チューブ内の水分移動を観察するために 2 台のビデオカメラ(GoPro Hero 5, GoPro Hero 8, GoPro)を設置した。

まず、 μG 下における排水過程の透水係数 K を推定するため、1G 下で水平に設置した多孔質体からの排水 (1G Horizontal) と、落下塔による μG 下における排水 (μG) を観察した。 μG 環境は北海道赤平市にある落下塔「コスモトーレ」(HASTIC)を使用した。特に飽和条件下において水分フラックス q は圧力勾配 i に比例し、その比例定数が K である¹⁷⁾。そこで、真空チャンバーのゲージ圧が、1G Horizontal 条件において -10, -20, -30, -40 kPa のとき、 μG 条件において -4.9 kPa から -42.8 kPa のときの排水速度から q および i を計算し、それぞれの条件下における q に対する i の比例定数を透水係数として算出した。

1G 下および μG 下における水分フラックス q と圧力勾配 i の関係を Fig. 5 に示す。どちらの重力条件下においても q が i に比例し、その比例定数から、透水係数は 1G Horizontal 条件において 2.8×10^{-2} cm/s、 μG 条件において 2.9×10^{-2} cm/s と算出され、差は見られなかった。したがって、水分飽和状態からの排水過程における透水係数は 1G 下と μG 下で変化しないことが明らかになった。

次に、負圧排水による水分の回収率と重力の関係

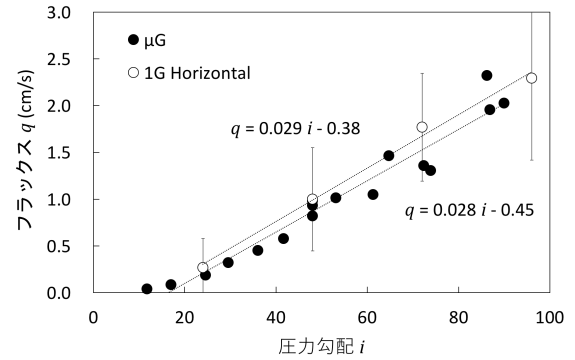


Fig. 5 1G および μG 下における圧力勾配と水分フラックスの関係.

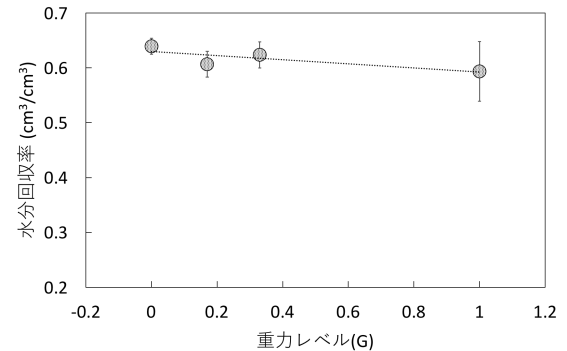


Fig. 6 水分が円形に分布した多孔質体から負圧排水を行った時の水分回収率.

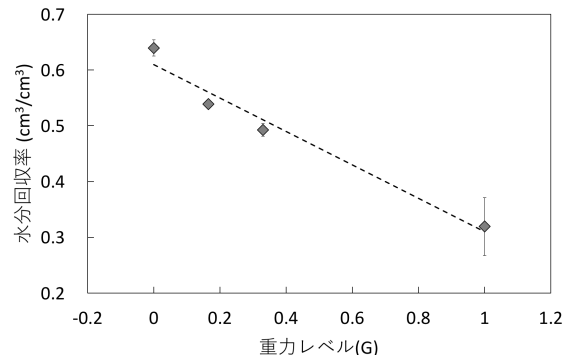


Fig. 7 水分分布が重力によって異なる多孔質体から負圧排水を行った時の水分回収率.

を明らかにするため、様々な重力下における排水実験を行なった。排水前に水平に設置した多孔質体の中央から 6 ml の脱気した蒸留水を注水した。水分は点滴ポイントを中心に同心円状に広がった。その後多孔質体カラムを傾け、「0G」「1/6G」「1/3G」「1G」条件を作成し、-20kPa で排水した。排水は真空チャンバー内の圧力が大気圧と同じになるまで継続し、水分回収率 C を次式によって算出した。

$$C = 1 - \frac{V_r}{V_i} \quad [5]$$

ここで V_i は排水前に多孔質体が給水していた水の体積 (cm^3)、 V_r は排水後に多孔質体に残留した水の体積 (cm^3) である。 V_r は多孔質体に残留した水の重量を炉

乾法により算出し、水の密度で除すことによって求めた。

水分が円形に分布した多孔質体から負圧排水を行った時の各重力条件下における水分回収率を Fig. 6 に示す。水分回収率は重力レベルとやや負の相関を示し(R=-0.5)、0G 下で 0.64 であったのに対して 1G 下では 0.59 であった。これは重力存在下において、排水ポイントである多孔質体中央部より下方に存在する水は、上方に存在する水に比べて回収しにくくなったためであると考えられる。

そこで、排水前の水分分布が重力によって異なる場合についても、同様に排水実験を行なった。前節で用いた浸潤実験装置を用いて、各重力下において多孔質体が 6 ml の脱気した蒸留水を吸水するまで浸潤実験を行い、その後、-20kPa で排水した。水分分布が重力によって異なる多孔質体から負圧排水を行った時の水分回収率を Fig. 7 に示す。前節で明らかになったように、多孔質体中央部より下方に存在する水の割合は、重力が大きくなるほど増加した。そのため、水分回収率は重力と強い負の相関を示し(R = -0.97)、1G 下では 0.32、1/6G や 1/3G などの部分重力(Partial G)下においてもそれぞれ 0.54、0.49 まで低下した。

4. まとめ

本研究では水や肥料などの限られた資源を効率的に利用する作物栽培手法として地中点滴灌漑を提案し、低重力下における適用性を実験的に調査した。実験の結果、1G 下に比べて低重力下では下方浸潤が抑制される一方で、上方浸潤が促進された。したがって月や火星環境で地中点滴灌漑を導入する際、水分の地上への露出を防止し、根圏への均一な給水を行うためには、点滴チューブを従来よりも深い位置に設置する必要がある。また、排水性の低下を補うために、給排水を同時に行うシステムの導入が必要である。本研究で検討した負圧排水により回収した水は灌漑水として再利用可能で水資源の効率的な利用にも寄与する。低重力下における水分回収率は 1G 下と比べて高く、重力が小さいほど高い水利用効率が期待される。また、これまで浸潤過程においては μ G 下における透水性の低下が報告されていたが、本研究により、水分飽和状態での排水過程ではそのような透水性の変化が起こらないことが明らかになった。

将来的に地球から投入する資材を削減し大規模な農業を行うためには、月や火星のレゴリスを栽培培地として用いる土耕栽培技術の確立が重要である。植物への効果的な水分供給システムを実現するため、今後も多孔質体中の水分挙動に対する重力の影響についてさらに理解を深める必要がある。

5. 謝辞

本研究は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機

構 宇宙環境利用専門委員会 短時間微小重力実験 (国際連携拡大版) の助成を受けたものである。また、微小重力実験は株式会社 植松電機の支援を受けて行った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 北宅善昭, 他; 長期有人宇宙ミッションでの生命維持に必須の食料生産, 物質循環, 健康維持機能を担う植物栽培システムの構築, 宇宙環境利用シンポジウム (第 30 回), (2016).
- 2) Massa, G. D., et al.; Veggie hardware validation testing on the International Space Station, *Open Agriculture*, 2(1), 33-41 (2017).
- 3) 北宅善昭; 宇宙開発と農学の接点, *学術の動向*, 21(2), 87-91 (2016).
- 4) Massa, G. D., et al.; Plant-growth lighting for space life support: a review, *Gravitational and Space Research*, 19(2), 19-30 (2007).
- 5) Camp, C. R.; Subsurface drip irrigation: a review, *Transactions of the ASAE*, 41(5), 1353-1367 (1998).
- 6) Badr, M. A., et al.; Efficiency of subsurface drip irrigation for potato production under different dry stress conditions, *Gesunde Pflanzen*, 62(2), 63-70 (2010).
- 7) 梶智光, 他; 地中点滴灌水同時施肥が根深ネギの収量および養分吸収に及ぼす影響, *日本土壌肥料学雑誌*, 88(1), 20-28 (2017).
- 8) Richards, L. A.; Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, 1(5), 318-333 (1931).
- 9) Jones, S. B., et al.; Modeling and design of optimal growth media from plant-based gas and liquid fluxes, *SAE Technical Paper* (2005).
- 10) Lu, T. X., et al.; Water movement in glass bead porous media: 1. Experiments of capillary rise and hysteresis, *Water Resources Research*, 30(12), 3275-3281 (1994).
- 11) 佐藤直人, 他; 多孔質体中の浸潤速度と重力の関係, 宇宙環境利用シンポジウム (第 33 回), (2019).
- 12) 藤原俊六郎; 図解土壌の基礎知識, *農山漁村文化協会*, p. 49 (2013).
- 13) 松中照夫; 土壌学の基礎: 生成・機能・肥沃度・環境, *農山漁村文化協会*, p. 93 (2003).
- 14) 北村耕一; 耕起方法による排水性の改善と根張り調査, *土づくりとエコ農業*, 48(1), 13-18 (2016).
- 15) Leinauer, B., et al.; A comparison of construction types and their associated irrigation systems: Effect on turfgrass quality, drought avoidance, and irrigation water use, *Acta Hort.* 661, 123-129 (2004).
- 16) 岩間秀矩, 他; 負圧水循環法による土壌水分制御とその応用, *土壌の物理性*, 68, 69-76 (1993).
- 17) 宮崎毅, 他; 土壌物理学, *朝倉書店*, p. 35 (2005).