

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

明治大学 登尾浩助、東京大学大学院 溝口勝

Feasibility of crop production in bases with atmospheric-pressure-domes on Moon and Mars

Kosuke Noborio¹ and Masaru Mizoguchi²

¹ Meiji University, Kawasaki, Kanagawa 214-8571

² The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8657

E-Mail: noboriok@isc.meiji.ac.jp, amizo@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

Abstract: To study the feasibility of crop production on Moon and Mars, theoretical considerations on water movement in porous media under low gravity conditions were organized.

Key words; porous media, water, crop

月・火星における大気圧ドーム型基地において作物生産をすることを目標にして、その可能性を探る。大規模な作物栽培には、現地の土壌（レゴリスあるいは多孔質体）を使うことが合理的であると考えられる。地球とは異なる重力と大気圧ドーム条件下での土壌中における水分と養分の挙動を把握することは作物栽培上重要である。本報告では、作物栽培するための基礎的な情報である月・火星の重力場における多孔質体中の物質とエネルギー挙動についての知見を整理した。

理論

(a) 水分張力：

1G・大気圧環境下では毛管内を上昇する水面高 h は、(1)式で示されるように重力 g の他に気液界面の表面張力 γ の影響を受ける（ヒレル, 2003）。

$$h = \frac{2\gamma \cos\alpha}{g(\rho_L - \rho_g)r} \quad (1)$$

ここで、 α は接触角、 r は毛管半径、 ρ_L と ρ_g はそれぞれ液体と気体の密度を表す。重力 g が一定であっても気液界面の表面張力 γ を変化させれば、毛管上昇高 h が変化することがわかる。従って、1G 環境下において気液界面の表面張力 γ を変化させることによって、毛管上昇高 h には重力 g を擬似的に変化させたと同等の効果が得られる。即ち、重力 g の液状水移動に与える影響を検証することが可能であると考えられる。

多孔質体中に保持される水分は、様々な半径の毛管が多数集まった毛管中に毛管上昇によって水分が保持されている状態と等価であると仮定できる（図- 1）。そして多孔質体中の水分張力 ψ は、大気圧を基準にすると毛管上昇高 h の負値として表される。

(b) 水分移動：

1G 環境下での多孔質体中の液状水移動は、次の質量保存式で表される（Richards, 1931）。

$$\rho_L \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial z} \quad (2)$$

ここで、 θ は体積含水率、 J は水分フラックスを表す。水分フラックス J は、次式で示すダルシー（Darcy）の法則で表される。

$$J = -K \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (3)$$

ここで、 K は透水係数、 ψ は水分張力である。

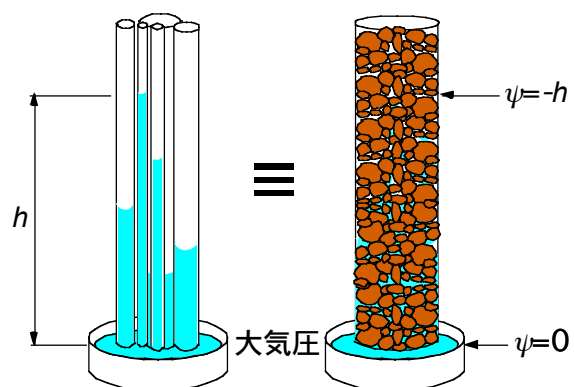


図- 1 毛管上昇と多孔質体中の水

(c) 水分特性曲線：

多孔質体中に含まれる水分量（体積含水率 θ ）と水分保持力（水分張力 ψ ）の関係を水分特性曲線と呼び、例えば次式で表される（van Genuchten, 1980）。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + \alpha |\psi|^n} \right]^{1-\frac{1}{n}} + \theta_r$$

(4)

ここで、 θ_s と θ_r はそれぞれ飽和体積含水率と残留体積含水率、 α はスケーリング係数、 n は当てはめ定数である。

整理する内容

(1)式で表される 1G 環境下の多孔質体中の水分が、1G 以外の環境下においてどのような振る舞いをするのかを中心に、月・火星基地における作物生産の可能性について整理した。月・火星基地は、大気圧あるいは作物生産が可能な程度に加圧されていると仮定した。さらに、作物生産に十分な水と光が得られると仮定した。そして、次の事柄について理論的な検討をした。

- (A) 水分分布は重力が異なるとどうなるか？
- (B) 1 G 環境下の理論は使えるのか？
- (C) 作物の吸水特性は重力には無関係か？
- (D) 水分量・水分張力の測定は可能か？

検討結果

- (A) 水分分布は重力が異なるとどうなるか？

月や火星のように地球に比べて重力加速度 g が小さくなると、式(1)が示すように毛管上昇高が大きくなる。即ち、水分張力が大きくなることと等価である。図- 2 には壤土に対する式(3)による水分特性曲線が示される。 α, n は、1G 環境下において実測値に式(3)を当てはめて得られる。月面を想定した 1/6G 環境下での水分特性曲線は、式(4)中のスケーリング係数 α のみが1/6になると仮定した。図- 2 をみると、重力が小さくなると水分張力が大きくなるのがわかる。

- (B) 1 G 環境下の理論は使えるのか？

最近、Heinse *et al.* (2007)は、式(3)で表される Darcy の法則は微小重力環境下でも有効であることをパラボリック飛行実験によって確認した。そして、式(2)で表される質量保存式も 1G 以外の環境下で適用可能であろうと結論づけた。しかし、パラボリック飛行実験では、1回の微小重力持続時間が 20 秒程度と短く、微小重力の発生前には 1G 以上が試料に作用することから、長期の微小重力環境下での更なる実験が必要であると結んでいる。

- (C) 作物の吸水特性は重力には無関係か？

しおれ点の水分張力 ($pF > 4.2$, 1.5MPa) において植物の細胞壁が破壊しなければ、重力には無関係と考えられる。1G・大気圧環境下では、植物は $pF 1.8$ (67kPa) から $pF 4.2$ (1.5MPa) までの水分張力に対応する水分 (有効水分) を利用する事ができると仮定する。

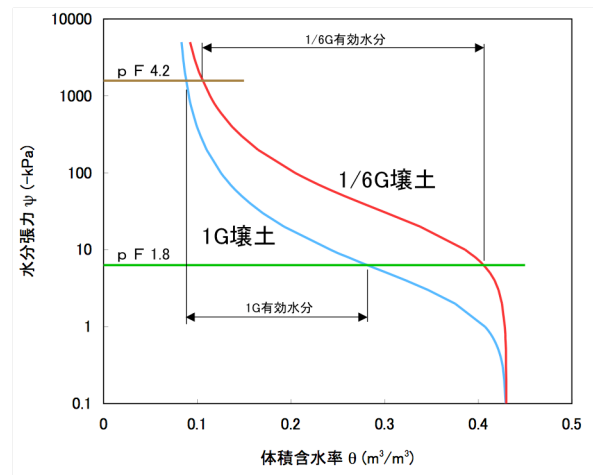


図- 2 重力別の推定有効水分量

例えば、月基地では重力が地球の 1/6 である。その時、多孔質体中の有効水分量は、1G 環境下の 1.5 倍程度になると考えられる (図- 2)。このことは、月・火星基地での作物生産は、地球上に比べて水を有効利用できる可能性がある事を示唆している。

- (D) 水分量・水分張力の測定は可能か？

可能である。NASA のフェニックス計画 (火星探査) では、我々の研究仲間である Campbell 博士親子のデカゴン社が製作した誘電率水分計と熱容量計が搭載されて現在火星に向けて飛行中である。

文献

- Heinse R., S.B. Jones, S.L. Steinberg, M. Tuller, and D. Or, *Vadose Zone J.*, 6, pp. 713-724, 2007.
ヒレル, ダニエル, 環境土壌物理学 I. 土と水の物理学, 農林統計協会, p. 55, 2003.
Richards, L.A., *Physics*, 1, pp. 318-333, 1931.
van Genuchten, M.Th., *Soil Sci. Soc. J.*, 44, pp. 892-898, 1980.