

## 多孔質体中の水分挙動の重力依存性

メタデータ	言語: ja 出版者: 公開日: 2019-07-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 佐藤, 直人 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10291/20279">http://hdl.handle.net/10291/20279</a>

# 2018年度 農学研究科

## 博士学位請求論文（要旨）

### 多孔質体中の水分挙動の重力依存性

農学専攻

佐藤 直人

#### 1 問題意識と目的

近年、宇宙探査技術の発展によって月、火星、エウロパ、エンケラドスなど、太陽系内の天体で水が存在する証拠の発見が相次いでいる。将来の有人宇宙探査では、宇宙飛行士の生命維持に必要な水を現地で調達することが望ましく、地球外の天体においてこれらの水がどのように多孔質体中に存在し、どのように利用することができるのか明らかにすることが重要である。加えて、宇宙空間に長期間滞在するため、現地で調達した水資源を用いて作物栽培を行う「宇宙農業」が検討されており、作物根圏に対する灌水を目的とした多孔質体中の水分挙動の研究が多く行われている。しかし、国際宇宙ステーションにおける多孔質体培地を用いた作物栽培システムでは、レタスを植えた培地が水源から十分な量の水分を吸収できずに発芽したレタスの芽が枯れてしまうなど、予想と異なる水分挙動が確認されており、多孔質体中の水分移動に対する重力の影響は明らかではない。そこで本研究では、重力の変化が多孔質体中の水分移動に与える影響を明らかにすることを目的として、多孔質体中の巨視的および微視的な水分移動について検討を行なった。

#### 2 構成及び各章の要約

不飽和多孔質体中の水分移動は、従来、リチャーズ式に代表される理論で表されると考えられていた。リチャーズ式によれば、鉛直方向の水分移動の駆動力はマトリックポテンシャル勾配と重力勾配であるが、とくに多孔質体中の水平方向のみの流れを考えるとときには、水分はマトリックポテンシャル勾配のみを駆動力として移動すると考えられる。マトリックポテンシャル勾配の主な要因である毛管力は微小重力 ( $\mu\text{G}$ ) 下においても働くことが報告されており、多孔質体中の水平流れを抽出する水平浸潤実験によって  $\mu\text{G}$  下における浸潤を適切に模擬できると考えられていた。しかし、宇宙ステーション Mir で 1.5 mm のガラスビーズを用いて行われた浸潤実験の浸潤速度と地上で行なった水平浸潤実験の浸潤速度を比較したところ、Mir における浸潤速度は地上の水平浸潤速度を大きく下回った。このように  $\mu\text{G}$  下では多孔質体中の水分挙動が予想と大きく異なったことから、従来の水分移動理論が適用できない可能性があることがわかった。そこで第2章では、1 G 下における水平浸潤と  $\mu\text{G}$  下における多孔質体中の浸潤を比較することで、現在の水分移動理論の適用性について検討を行った。まず、0.4 mm のガラスビーズを用いて  $\mu\text{G}$  下における浸潤を観察した。 $\mu\text{G}$  環境は航空機を放物線飛行させるパラボリックフライトによって獲得した。1 回のパラボリックフライトの  $\mu\text{G}$  継続時間は 18 秒–20 秒程度であるので、連続した 3 回のパラボリックフライトを実施して  $\mu\text{G}$  環境を作出し実験を行なった。 $\mu\text{G}$  下における浸潤と比較するために行なった 1 G 下の水平浸潤実験に比べて、 $\mu\text{G}$  下の浸潤実験では浸潤速度の低下が観察されたが、その低下量は 1.5 mm のガラスビーズを用いた Mir の実験の低下量よりも小さかった。このような浸潤速度の低下は粘性の大きな浸潤溶液を使用した実験においても報告されており、間隙径が小さい多孔質体や高い粘性によりゆっくりとした浸潤が起こる条件では重力の低下による浸潤速度の低下量が小さくなる可能性が示唆された。また、既往の研究から気相の捕捉（乾燥ポケット）が、浸潤速度の低下の原因である可能性が指摘されているので、乾燥ポケットがほとんど発生していないと考えられる浸潤初期における多孔質体中の水分移動を観察した。落下塔による約 2.8 秒の  $\mu\text{G}$

環境下において 1 mm および 2 mm ガラスビーズ多孔質体中の鉛直上方浸潤を観察した。1 mm のガラスビーズを用いた実験では実測値と理論値が一致し、極めて初期の浸潤には現在の水分移動理論が適用可能であることが明らかになった。また、粗い粒径 (2 mm) では、部分的に“ジャンプ”と呼ばれる瞬間的な水分移動が観察された。このような微視的な水分挙動が浸潤速度に大きな影響を与えたことから、 $\mu\text{G}$  下における水分移動を明らかにするには単一空隙内の水分挙動についても検討する必要があることが判明した。

$\mu\text{G}$  下において浸潤速度が低下した原因として、多孔質体中の飽和度が低下した可能性が指摘されている。空隙の中には浸潤を阻害する形状が存在することが報告されており、空隙形状と水分挙動の関係を明らかにする必要がある。そこで第 3 章では、単一空隙中の水分移動を観察し、微視的な水分挙動に対する重力の効果を明らかにした。通直な毛管に働く毛管力の理論を、実際の多孔質体中に存在するような逆円錐型の毛管に働く毛管力を表す理論に拡張した。また、接触角の影響を明らかにするため、親水性および撥水性のガラスビーズで作成した 2 次元多孔質体中の水分移動をビデオカメラで観察し、COMSOL Multiphysics を使ったシミュレーションの結果と比較した。加えて、空隙形状の影響を明らかにするため、粒子間距離の異なる単一空隙中の水分挙動について COMSOL Multiphysics によるシミュレーションを行った。シミュレーションの結果、大きい接触角 (撥水性) や粒子間距離の増加によって単一空隙中で水分移動が停止し、浸潤が阻害された。このことから、単一空隙中で水分移動が停止するかどうかは接触角と粒子間距離で決定されることが明らかになった。しかし、小さな液滴界面では重力変化による接触角の変化は小さいと考えられており、月や火星のレゴリスや宇宙農業での使用が想定される多孔質体では接触角の影響は小さいと考えられる。一方、1G 下では重力によって粒子が下方向に押し付けられ、粒子が密に配列するのに対して、 $\mu\text{G}$  下では粒子の配列が変化し、粒子同士の距離が大きくなることが報告されており、このような粒子配列の変化は空隙径分布や水の連続性に影響を与える可能性がある。従って、従来の低重力下における実験では、粒子同士の距離が大きくなることで浸潤を阻害する空隙が増加し水分移動が低下した可能性がある。

多孔質体の水の通りやすさを表す指標である透水係数は粘性や表面張力、接触角の関数である。小さな気液界面では接触角に対する重力の影響は小さいと報告されている一方で、粘性は重力で変化することが報告されており、重力変化による粘性や表面張力などの浸潤溶液の物理性の変化が水分移動に影響を与える可能性がある。そこで第 4 章ではそれらの物理性の変化が浸潤に与える影響を複合的に評価するため、次元解析により表面張力および粘性が浸潤速度に与える、相対的な影響力の大きさを定量するパラメータ「S-N number」を提案した。また、浸潤溶液として様々な濃度のエタノール水溶液を用いて水平浸潤実験を行ない、S-N number の適用可能性を検討した。エタノール濃度 0 vol% から 30 vol% では濃度の増加とともに浸潤速度は低下したが、70 vol% から 100 vol% では濃度の増加とともに浸潤速度は増加した。このような表面張力および粘性の変化による水平浸潤速度の変化は S-N number と強い相関があった。従来用いられてきたパラメータ「 $fn$  数」は重力の存在を前提としており、 $\mu\text{G}$  下では新たに提案した S-N number による評価が望ましいと考えられた。

宇宙における作物栽培システムの構築を目的とした多孔質体中の水分挙動に関する研究は 1990 年代に開始され 20 年以上行われてきた。それにもかかわらず現在まで多孔質体中の水分挙動が明らかでないのは、微小重力下で土壌物理実験を行うことの困難さが原因である。宇宙実験の複雑さとコスト高は、議論の範囲と一般性を制限し、実験回数の少なさのため統計的な信頼性を確保できない要因となっている。多孔質体中の水分挙動をより信頼性高く、より厳密に計測するためには、より長い期間の微小重力実験が必要である。そこで第 5 章では植物実験や微生物実験で用いられている 3D クリノスタットを用いて土壌物理実験を行い、微小重力下の現象の再現可能性について検討した。3D クリノスタットは、サンプルを無作為に回転させることにより、あらゆる方向の重力による刺激を排除する装置であり、地球上で  $\mu\text{G}$  を模擬する手段として考案された。クリノスタットはパラボリックフライト実験や観測ロケット実験を行うよりも低価格で利用可能であり、また長時間の実験が可能となる。ただし、3D クリノスタットにより  $\mu\text{G}$  を模擬可能かどうかは、回転周波数、実験試料の重力感受性、質量、密度、試料を取り囲む媒体の粘度や密度等に依存すると考えられており、実験を行う対象毎に判断する必要がある。本研究では粒度の異なる 3 種類の多孔質体 (豊浦砂、ガ

ラスビーズ (0.05 mm), 関東ローム) を用いて浸潤実験を行なった. ガラスビーズと関東ロームのように透水性が小さく, 速度の遅い流れが生じる多孔質体では重力浸潤を相殺できた. しかし, その浸潤速度は水平浸潤実験と一致し,  $\mu\text{G}$  下における浸潤速度の低下を模擬できなかった. 多孔質体中の水分移動は複雑で, 流路は分岐と集合を繰り返しながら, 縦・横・斜めに繋がっている. 水平浸潤実験やクリノスタットによる擬似  $\mu\text{G}$  下では, 常にいずれかの流路に沿って重力が働いている状態であり, その流路に沿った微小な流れを排除できなかった可能性がある. また,  $\mu\text{G}$  下では, 粘性や接触角といった浸潤溶液の特性が変化する可能性があるが, 1 G 下で行った今回の実験系では浸潤溶液の特性の変化までは模擬できないことが明らかとなった. 重力浸潤をほぼ完全に排除できるクリノスタットを使って  $\mu\text{G}$  下における真の浸潤を模擬するためには,  $\mu\text{G}$  下における溶液特性に近い特性を持つ浸潤溶液を用いるなどの検討が必要である.

本研究により, 粒子間距離の増加といった間隙形状の微視的な変化は, 浸潤阻害間隙の発生を促進することが明らかになった. このような幾何学的な変化により間隙水が不連続になると, 多孔質体の巨視的飽和度が低下し透水係数が低下すると考えられる. また, 幾何学的な変化だけではなく, 浸潤溶液の物理性の変化によっても浸潤速度が低下することを明らかにした. 現在, リチャーズ式の重力依存パラメータは重力項のみであり, 他の項に重力は含まれない.  $\mu\text{G}$  下における水分移動を推定するためには飽和度の低下や浸潤溶液の物理性の変化を考えに含めたリチャーズ式の見直しが必要である.