

## 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>

## 「博士学位請求論文」審査報告書

審査委員 (主査) 農学部 専任教授

氏名 登尾 浩助 (印)

(副査) 農学部 専任准教授

氏名 小島 信彦 (印)

(副査) 農学部 専任講師

氏名 矢崎 友嗣 (印)

(副査) 東京大学大学院農学生命科学科 教授

氏名 溝口 勝 (印)

- 1 論文提出者 佐藤 直人
- 2 論文題名 多孔質体中の水分挙動の重力依存性  
(英文題) Gravity Dependence of Liquid Flow in Porous Media

### 3 論文の構成

- 第1章 はじめに  
第2章 微小重力下における従来の水分移動理論の適用性の検討  
第3章 空隙内の水分挙動  
第4章 浸潤溶液の物理性が多孔質体中の水分移動に与える影響  
第5章 擬似微小重力実験の適用性の評価  
第6章 総括  
本論文は以上の6章から構成されている。

### 4 論文の概要

近年の宇宙探査によって火星や月といった地球外惑星や衛星において水の発見が相次いでいる。また、人類の長期宇宙探査計画が現実味を帯びているので、地球外での作物栽培の必要性が認識されつつある。国際宇宙ステーション内など宇宙空間での植物栽培は部分

的には成功しているが、微小重力環境下での多孔質体中における水分挙動に関する従来の研究は極めて限定的である。本研究は、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関して落下塔や航空機を使って作り出した微小重力環境下において種々の実験を行うと同時に、数値実験用モデルを構築して数値実験を行い、理論的考察を加えた。

第1章では、近年地球外の天体において相次いで水が存在する証拠が発見されていること、そして、将来の有人宇宙探査に言及し、人間の生命維持には「宇宙農業」が必要であることを紹介した。そして、これまで宇宙ステーションで実施された多孔質体を使った作物栽培がうまくいかなかった事例を紹介し、地球上と重力の異なる宇宙における多孔質体中の水の動きには、地球上の重力（1G）下で導出された従来の水分移動理論（Richards式）が適用できないのではないかと結論づけた。

第2章では、従来の多孔質体中における水分移動理論の適用性を航空機の放物線飛行と落下塔を使った微小重力（ $\mu$ G）下での実験結果をもとに検討した。航空機を使った微小重力は20秒間程度しか作り出すことができないため、放物線飛行を繰り返すことによって微小重力の影響が連続的に水分移動に作用するような特別な実験装置を開発して、42秒間の $\mu$ G下における直径0.4mmガラスビーズを使った多孔質体への水分浸潤結果を得た。過去に1回だけ宇宙ステーションミール内で実施された1.5mm直径のガラスビーズを使った水分浸潤実験結果から、1G下の水平浸潤実験と比較すると浸潤速度が低下することが報告されている。このミール内実験と比較して、間隙径がより小さい多孔質体では、浸潤速度がより早くなることを発見した。即ち、間隙径の大きい多孔質体における浸潤速度低下の原因が気相の捕捉（乾燥ポケット）によると考えられることから、落下塔を使って間隙径の異なるガラスビーズ内への水分浸潤実験を行なった。そして、気相の保持が発生していない浸潤初期では水分浸潤速度は理論値と一致し、間隙径が大きい多孔質体では部分的に“ジャンプ”と呼ばれる瞬間的な水分移動が起こることを明らかにした。Richards式の重力依存パラメータは重力項のみであるが、 $\mu$ G下における水分移動の推定には、特に浸潤後期における透水性の低下を考慮する必要があるとあり、透水係数が重力や時間に依存して変化する可能性を考慮した理論の見直しが必要であると結論づけた。

第3章では、間隙内の水分挙動に関して微視的な視点から数値実験を行い、さらに親水性と撥水性がラスビーズを使った実験結果と比較した。数値実験では、曲率半径0.5mmの局面粒子に沿って気液界面が時間経過によって親水壁と撥水壁どのように移動するのかを粒子間隔を0.2mmと0.29mmに設定して、レベルセット法による2相流の界面追跡を $10^{-3}$ 秒間行なった。親水条件下では浸潤可能な形状の間隙であっても撥水条件下では浸潤阻害間隙として働き、その間隙内で気液界面移動が停止したことから、接触角は単一間隙中の浸潤の可否を支配する要因であることを明らかにした。さらに、粒子間隔が0.29mmの場合は、親水条件下であっても浸潤が阻害されたことから、多孔質体中の水の接触角の変化だけではなく、多孔質体の微小構造のわずかな変化によっても水分移動が大きく変化することを明らかにした。また、親水性と撥水性ガラスビーズ内の水分移動は、数値実験結果を支持する結果であった。

第4章では、従来から使われている浸潤溶液の物理性が多孔質体中の水分移動に与える

影響を表す流動係数（fm 数）では、可変重力下での現象を表せないことを指摘し、次元解析を使って新たな S-N 数を提案した。S-N 数はある液体の粘性と表面張力の相対的な重要性を定量的に表わし、水平浸潤において水に対する相対的移動度を示す指標として用いることができる。密度、粘性、表面張力が異なる様々な濃度のエタノール溶液を使った浸潤実験を行い、新たに提案した S-N 数の適用性を確認した。

第 5 章では、模擬微小重力実験装置の水分浸潤実験への適用性を評価した。宇宙ステーションを使った長時間の  $\mu G$  実験が利用困難なことから、 $\mu G$  環境を模擬する方法として植物実験や微生物実験において利用実績のある 3D クリノス タットが使えるのではないかと考えて評価実験を行なった。粒径の異なる多孔質体中への水分浸潤実験を行なった。粒径の大きい豊浦砂への浸潤実験では、重力の変動が浸潤速度に影響したが、粒径の小さい関東ロームや直径 0.05mm のガラスビーズでは、水平浸潤実験と同じ結果になった。宇宙ステーションミールで行なった実験のように浸潤速度が低下しなかったことから、クリノスタットを使って  $\mu G$  下における浸潤を模擬するためには、 $\mu G$  下における特性に近い特性を持つ液体を用いる必要があると提案した。

第 6 章では、総括として各章のまとめを記述し、Richards 式の見直しが必要であると結論づけた。

## 5 論文の特質

地球外での水の発見が相次ぎ人々の関心が高いにも関わらず、この水が地球外重力下の多孔質体中でどのように振る舞うかについては世界の人々の関心は極めて低い。このような状況下で、従来の水分移動理論である Richards 式の微小重力下における適用性を理論と実験の両面から丁寧に検証した点が本論文の特質である。様々な工夫を凝らした実験装置の開発から微小重力下での実験と理論的考察に至るまで、誰もがユニバーサルであると信じて疑わなかった水分移動理論に柔軟な思考をもって果敢に挑戦した極めて革新的な論文である。

## 6 論文の評価

本論文を構成する各章の内容のうち、既に 2 報が著者を筆頭として学術誌に掲載済み、あるいは掲載が決定している。また、残りの章の内容についても現在投稿用原稿を作成中であるので、全体として完成度と新規性が高い論文であると評価できる。内容の新規性、独創性、将来への発展性、土壌物理学分野への貢献等を総合的に判断して、極めて高く評価することができる。

## 7 論文の判定

本学位請求論文は、農学研究科において必要な研究指導を受けたうえ提出されたものであり、本学学位規程の手続きに従い、審査委員全員による所定の審査及び最終試験に合格したので、博士（農学）の学位を授与するに値するものと判定する。

以 上