

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 25 日現在

機関番号：32682

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26660192

研究課題名（和文）微小重力下における多孔質体中の水分移動の解明

研究課題名（英文）Water movement in porous media under microgravity

研究代表者

登尾 浩助（Noborio, Kosuke）

明治大学・農学部・専任教授

研究者番号：60311544

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：微小重力下での多孔質中の水分挙動は未だに明らかになっていない。放物線飛行による疑似 μ G 場において毛管上昇実験と土壌中への水分浸潤実験を行い、微小重力下での水分移動を解明することを目的とした。航空機による放物線飛行と落下塔による自由落下によって μ G 環境を作り出し、毛管上昇と多孔質体中への水分浸潤が受ける微小重力の影響に関する実験を実施した。一連の実験から、毛管上昇理論の微小重力への適用性を確認した。しかし、細い内径の毛管の上に太い内径の毛管をつないだ場合には水分移動が阻害されることが明らかになった。多孔質体中への水分浸潤は、微小重力下では著しく阻害されることがわかった。

研究成果の概要（英文）：Water behavior in porous media under microgravity has not been elucidated yet. Our objectives were to elucidate water infiltration and the applicability of the capillary rise theory under microgravity. We conducted experiments on capillary rise and water infiltration into porous bodies under a μ G environment made by parabolic flights by aircraft and free fall by a falling tower. Based on a series of experiments, applicability of the capillary rise theory to microgravity was confirmed. However, it was revealed that water transfer was inhibited when a large inner diameter capillary tube was connected to a small inner diameter capillary tube. It was found that moisture infiltration into porous media was significantly inhibited under microgravity.

研究分野：農業農村工学

キーワード：放物線飛行 落下塔 毛管上昇 水分浸潤 多孔質体

1. 研究開始当初の背景

長期間の宇宙飛行中の食料自給や月／火星基地においてレゴリス中の水分を利用するためには、宇宙環境下での多孔質体中の水分挙動を理解することが不可欠である。ところが、1G以下の微小重力 (μG) における多孔質体中の水分挙動は、Dani Or が率いる研究チームが論文を発表している程度で (Bingham ら, 2000; Steinberg ら, 2002; Heinse ら, 2007)、未だに明らかになっていないのが実情である。我が国では、溝口・登尾 (2001) と登尾・溝口 (2008) が、低圧力下における多孔質体中の水分挙動の実験を実施し、 μG 下での作物生産の可能性を示唆した。

研究代表者である登尾のグループは、近年、放物線飛行で得られる μG 下において、鉛直カラムに充填したガラスビーズ間隙内の水分はほとんど移動しなかったが、何も充填していないカラム内では壁面に沿って水が上昇したと報告している (渡辺ら, 2012; 名倉ら, 2013)。また、2013年に国際宇宙ステーション内でカナダ人宇宙飛行士が実施したタオルの水を搾り取る実験では、乾いたタオルに水が吸収されない様子が示された。さらに、微小

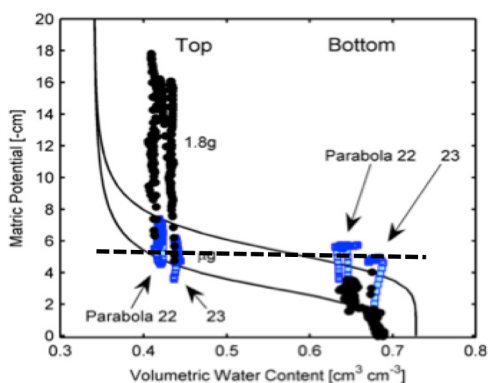


図1. 微小重力下の水分特性曲線 (Heinse ら, 2007)。パラボリック飛行 (微小重力) 実験下では点線で示したように体積含水率の大小に依らずほぼ一定である。

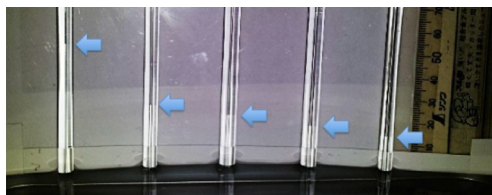


図2. 1G重力下での様々な半径の毛管を使った水の毛管上昇実験。内径は左から 0.5mm, 1.0mm, 1.4mm, 1.6mm, 2.0mm である。この図のようにジュレンの式 (式1) が成り立つことが分かる。

重力下の水分特性曲線では、体積含水率の大小に関わらずマトリックポテンシャルが点線で示したようにほぼ一定であることがわかる (図1)。

多孔質体中の水分は毛管力によって保持されていると考えられている。水の毛管上昇は、教科書にも出てくる広く知れ渡った現象である (図2)。毛管上昇高さ h は、使用する液体の表面張力 γ と重力加速度 g による液体の質量との釣り合いによって以下のジュレンの式で決定される (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。微小重力下では、 g が非常に小さくなるので理論上は h が無限に大きくなり、飽和部との間に極めて大きいマトリックポテンシャル勾配が生ずる。しかし、現実には、ガラスビーズの中の水はほとんど移動せず、空のカラム内の水が壁面に沿って上昇した (渡辺ら, 2012)。ガラスビーズ内で水が動けなかったのは、接触角 α が μG 下では変化したせいで起きたのか、または毛管半径 r が小さいと透水係数が減少するせいで起きたのであろうか。あるいは、表面張力 γ が μG によって変化したのであろうか。このように、我々は μG 下では 1G 下のようなマトリックポテンシャルが多孔質体中に発生しないのではないかと考えた。

2. 研究の目的

近年の火星や月の探査から、これらの惑星／衛星のレゴリス中に水分が存在することが明らかになってきた。宇宙基地においてこれらの水を利用するためには、1G以下の μG 下における多孔質中の水分挙動を理解する必要があるが、国内外の研究を見ても未だに明らかになっていないのが実情である。本申請研究では、放物線飛行による疑似 μG 場において毛管上昇実験と土壌中への水分浸潤実験を行い、表面張力とマトリックポテンシャルに対する μG の影響を把握し、微小重力 (μG) 下での水分移動を解明することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 毛管上昇

a. 通直な毛管

航空機 (MU-300, Diamond Air Service Co., Ltd., Nagoya, Japan) による放物線飛行によって μG 環境を作り出した。放物線飛行では約 20 秒間の 2G 環境を経たのち、約 20 秒間の μG 環境となり、その後 1.5G 環境となった。実験はこの 20 秒間の μG 環境下において行った。放物飛行実験は 2014 年 12 月 3 日、4 日の 2 日間で合計 22 回行った。

水平に設置した内径 2.5cm、長さ 16cm の塩ビ管の中に脱気水を注入し、内径 0.4mm、0.6mm、0.8mm の 3 種類の毛管をそれぞれ 2 本

ずつ塩ビ管の上に図3のように設置した。毛管と塩ビ管内の脱気水が自由に行き来できるようにした。また塩ビ管には調圧口を設け、塩ビ管内の自由水面が航空機内気圧と等しくなるようにした。塩ビ管、毛管、調圧口の先は内径 3.8mm 長さ 14cm のビニールチューブにつなぎ、さらに直径 2.7mm 長さ 55cm のビニールチューブで電磁弁 (USB3-6-3, CKD) を介して伸縮自在な調圧バッグに接続した。毛管内の水位変化はビデオカメラ (HDC-TM60, Panasonic) を用いて撮影した。撮影した動画は静止画に分割し、画像解析ソフト (ImageJ) を用いて毛管上昇高を決定した。

b. 複雑な形状の毛管

落下塔に設置した実験装置を載せたカプセルを自由落下させて μG 環境を得た。本実験で使用した落下塔は、北海道赤平市にあるコスモトーレ (HASTIC) であった。落下塔の高さは 50 m で、約 2.5 秒の μG 環境を得る事ができた。実験は 2015 年 9 月 29 日から 10 月 1 日までの 3 日間で合計 6 落下実験を行った。用

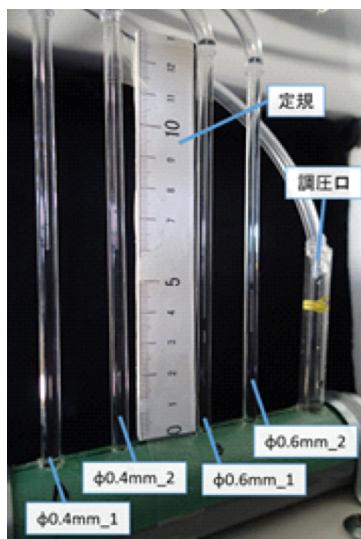


図3. 異なる内径の毛管による毛管上昇実験

意した管の下端を水源に立てて設置し、微小重力下における水位の変化をビデオカメラによって記録した。毛管には、①屈曲したものを3本と、②内径の異なる2つの管を接続したものを用意した。②は、下に内径 0.8 mm で上に内径 2.2 mm の管を接続したものを2本と、下に内径 2.2 mm で上に内径 0.8 mm の管を接続したものを1本用意した。

(2) 浸潤実験

微小重力 (μG) 下における水分浸潤を正確に評価するためには過重力による影響を取り除かなければならない。そのためには、水分浸潤が μG 状態になってから開始され、体積含水率の変化を継続的に観測する必要がある。そのために、図4の模式図で示すような装置を開発した。水源は2つ用意した。1つは多孔質体と水を接触させる為の水源でペリスタポンプを経由してカラムに繋がった。もう一つは

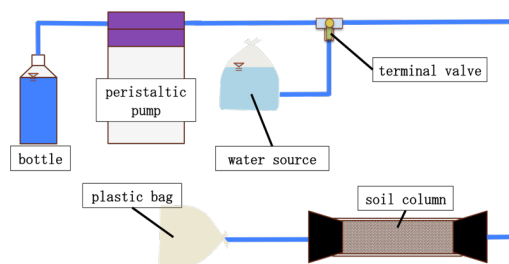


図4. 微小重力下における水平浸潤実験装置模式

多孔質体はその吸水力により水を吸う為の水源で、水で満たされ空気を抜いた。またこの水源は柔らかいビニール袋で作成し、多孔質体が水を吸うのを妨げないようにした。2つの水源から延びるウレタンチューブは3方コックで繋がれ一本になり、多孔質体の充填されたアクリルカラムの一端に繋がれた。実験前には、3方コックはペリスタポンプ側とカラムを繋ぐように開かれており、ビニール袋側は閉じられていた。水はペリスタポンプにより3方コックとカラムの中間の位置まで吸水された状態で停止させた。この時点における水の位置は、5秒ほどペリスタポンプを回すことで多孔質体に接触する位置に設定した。 μG の3秒前からペリスタポンプを8秒間動作させた。その後、水源がペリスタポンプ側からビニール袋側になるように3方コックを切り替えた。このシステムによって、 μG 前の過重力の影響を排除し、水分浸潤が μG 状態になってから開始されるようにした。

多孔質体は内径 2.4 cm のカラム内に 5 cm の長さになるように充填し、両端にはナイロン製のメッシュを挟みゴム栓をした。ゴム栓の中心に直径 5 mm の穴を開けチューブを外側から差し込んだ。カラム内の体積含水率を測定するため、2極水分センサーを 5 mm 間隔で 9 個差し込んだ。2極センサーの電圧はデータロガーにより、2秒ごとに測定され記録された。2極センサーは地上においてキャリブレーションを行い、電圧から体積含水率を算出した。これによりカラム内の水分分布を継続的に測定した。カラムの水源と反対側から延びるチューブは空気や水の出口として大気に解放される必要があるが、装置は密閉される必要があるため、空のビニール袋を取り付けた。また、パラボリックフライト中のカラムの様子はビデオカメラによって撮影した。

4. 研究成果

(1) 毛管上昇

a. 通直な毛管

図5に通直な毛細管における毛管上昇高の変化の結果を示す。横軸が経過時間で、縦軸が毛管上昇高である。赤い実線が G データ、破線はジュレンの式 (式(1)) による理論値、プロットが実測値である。ただし、理論値の最大値は毛管高さの 144mm としている。14秒から 27秒までの 13秒間は 2G の過重力状態

で、30 秒から 49 秒までの 19 秒間が微小重力状態だった。過重力においても微小重力においても、理論値の変化に比べて実測値の変化の方が遅かったが、それぞれの重力下において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、微小重力下において毛管上昇理論が適用可能であることが確かめられた。

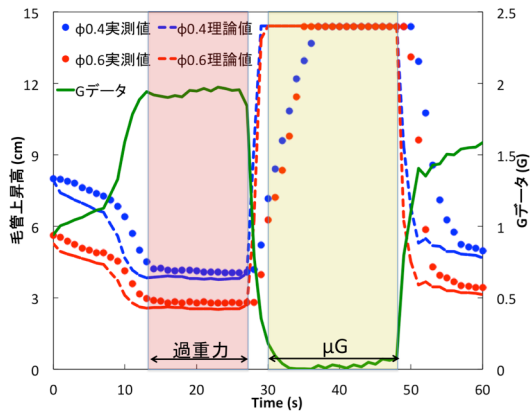


図5. 毛管上昇高の変化。赤の網掛け部 (14 秒から 27 秒) は約 2G の過重力環境、黄の網掛け (30 秒から 49 秒) は微小重力環境であった。

b. 複雑な形状の毛管

屈曲した管の結果を図6に、内径の異なる2つの管を接続したものの結果を図7に示す。図中に矢印で水位を示した。また左上に、落下開始からの経過時間を示した。屈曲した管では、落下開始から 1.3 秒後には管上端まで

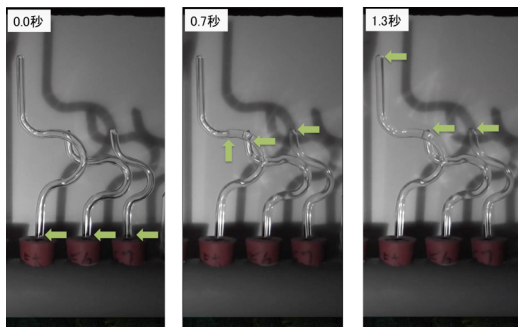


図6. 屈曲した毛管内における水位の変化: 矢印は各時間における各毛管の水位を示す。落下開始から 1.3 秒後には水位はすべての毛管で最上端まで到達し、停止した。

水位が上昇した。また、下部が内径 2.2 mm で上部に内径 0.8 mm の管を接続したものにおいても、2.1 秒後には水位は管上端に位置した。しかし、下に内径 0.8 mm で上に内径 2.2 mm の管を接続したものにおいてのみ、水位はその繋ぎ目までで停止し、それ以上の太い管への水位上昇が起こらなかった。

(2) 浸潤実験

浸潤速度の測定は、多孔質体内に 5 mm ごとに設置されたセンサーにより体積含水率が上

昇したと判断された時間を記録することによって行った。図8には、1G および μG における水分浸潤速度の結果を示した。横軸はマリ奥特管による給水開始からの経過時間で、縦軸は浸潤距離である。 μG 実験では、マリ奥特管による給水開始の 3 秒後から 20 秒間が微小重力環境であった。1G においては時間の経過とともに浸潤距離が大きくなっていき、23 秒後には 30 mm まで浸潤が進んだ。一方で μG では、13 秒後に 5 mm に到達したのみで、微小重力環境が終了する 23 秒後になっても 10 mm 地点のセンサーに反応は無かった。 μG 下において、水分浸潤は著しく阻害された。 μG 環境が終了するとただちに 1.5G から 2G の過重力環境となった。図8の μG のプロットにおいて 23 秒以降のプロットは過重力下におけるものである。浸潤速度は 1G よりも上昇したが、これは過重力によって、ビニール袋が圧縮され、水が押し出されたためだと考えられた。

μG においても 1G においてもペリスタポンプによる給水開始から 23 秒後における水分分布を実験終了時の水分分布として、図9に示した。1G 下においては、25 mm から 35 mm の間で体積含水率が急に低下したことから、

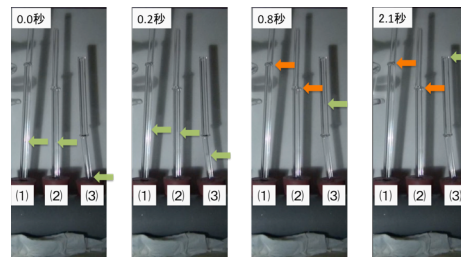


図7. 内径の異なる管を接続した毛管内における水位の変化: 内径 0.8 mm の上に内径 2.2 mm を接続した管 (1) (2) と、内径 2.2 mm の上に内径 0.8 mm を接続した管 (3)。矢印は各時間における各毛管の水位を示す。

この間に浸潤前線があると分かる。浸潤前線よりも手前では、体積含水率が $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ から $0.45\text{m}^3/\text{m}^3$ の値を取り、多孔質体はほぼ飽和していた。一方で μG では 5 mm から 10 mm の間

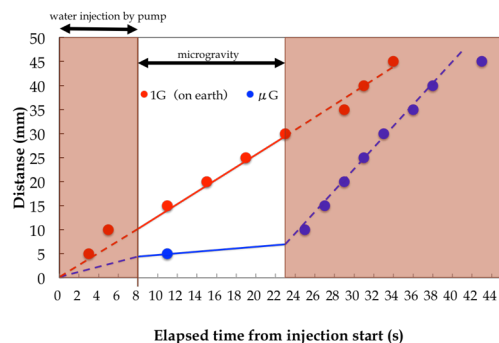


図8. 1G および μG 下における水平浸潤速度の違い: 横軸はペリスタポンプによる注水開始からの経過時間の二乗根で、縦軸は浸潤距離である。

に浸潤前線があると予想されるが、浸潤前線より手前の 5 mm 地点においても体積含水率が $0.1\text{m}^3/\text{m}^3$ であり、多孔質体は不飽和であった。

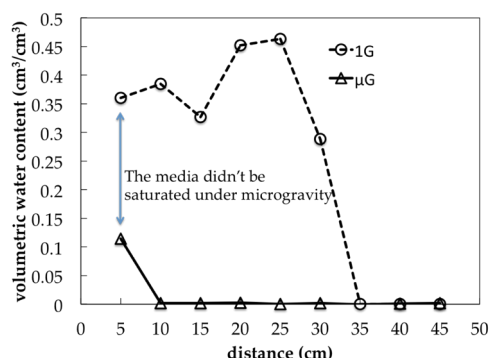


図9. 1G および μG における実験終了時の水分分布。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

佐藤直人・登尾浩助・丸尾裕一・名倉理紗・上出稜: μG と 1G 条件下における多孔質体への水分浸潤, *Space Utilization Research*, vol. 30 (2016) 査読無

佐藤直人・登尾浩助・丸尾裕一: 微小重力下における多孔質体中の浸潤初期の水分移動速度, *Space Utilization Research*, vol. 31 (2017) 査読無

丸尾裕一・佐藤直人・登尾浩助: 微小重力下における様々な形状のガラス管内の水の挙動, 2016 土壌水分ワークショップ論文集 4-7 (2017) 査読無

[学会発表] (計 19 件)

佐藤直人: 微小重力下における土の中の水移動, 生態工学会 次世代科学社会活性化シンポジウム 2017 (2017) 査読無

Naoto Sato, Kosuke Noborio, and Yuichi Maruo: The Microgravity Effects on Upward Infiltration in Porous Media, ASA, CSSA & SSSA International Annual Meetings 2016, Arizona, USA (2016) 査読無

Naoto Sato, Risa Nagura, Yuichi Maruo, Ryo Kamide and Kosuke Noborio: Measurements of Water Infiltration in Unsaturated Porous Media under Microgravity, The Joint Conference of 6th International Symposium on Physical Sciences in Space and 10th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Applications (2015) 査読無

Naoto Sato and Kosuke Noborio: Effects of the Surface Tension on Horizontal Infiltration, ASA, CSSA & SSSA

International Annual Meetings 2014, California, USA (2014) 査読無

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

登尾浩助 (Noborio, Kosuke)
明治大学・農学部・教授
研究者番号: 60311544

(2) 研究分担者

溝口勝 (Mizoguchi, Masaru)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授
研究者番号: 00181917

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

佐藤直人 (Sato, Naoto)
丸尾裕一 (Maruo, Yuichi)
ホートン・ロバート (Horton, Robert)