

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	http://hdl.handle.net/10291/20279

明治大学大学院農学研究科

2018 年度

博士学位請求論文

多孔質体中の水分挙動の重力依存性

(Gravity Dependence of Liquid Flow in Porous Media)

学位請求者 農学専攻

佐藤 直人

目次

図表一覧	iii
第 1 章 はじめに	1
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	6
2.1 多孔質体中の水分移動理論	6
2.2 パラボリックフライトによる μG 実験	7
2.2.1 実験方法	7
2.2.2 結果と考察	9
2.3 浸潤初期の水分移動速度	11
2.3.1 浸潤速度の低下と気相の捕獲	11
2.3.2 実験方法	12
2.3.3 結果と考察	12
2.4 まとめ	13
第 3 章 間隙内の水分挙動	28
3.1 巨視的水分挙動と微視的水分挙動	28
3.2 実験方法	29
3.2.1 数値シミュレーション	29
3.2.2 単層多孔質体中の界面移動観察	30
3.3 結果	30
3.3.1 COMSOL によるシミュレーション	30
3.3.2 水平浸潤における界面移動観察	31
3.4 考察	31
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	45
4.1 浸潤溶液の物理性と従来の相対的移動度指標	45
4.2 次元解析による水平浸潤理論の推定と S-N NUMBER の提案	47
4.3 実験方法	48
4.4 結果と考察	49
4.5 結論	50
第 5 章 擬似微小重力実験の適用性の評価	60
5.1 3D クリノスタットによる微小重力実験の必要性	60

5.2 実験方法	61
5.2.1 クリノスタットによる擬似微小重力の作出	61
5.2.2 実験試料と実験装置	61
5.2.3 擬似微小重力実験	62
5.2.4 水平浸潤実験	62
5.3 結果	63
5.3.1 擬似微小重力実験	63
5.3.2 クリノスタット実験と水平浸潤実験の比較	64
5.4 まとめ	64
第 6 章 総括	76
記号	78
謝辞	80

図表一覧

第 2 章

図 2.1 浸潤実験装置

図 2.2 実験飛行中の重力変化（上）と，それぞれの放物線飛行（PF）における重力変化（下）

図 2.3 μG 下における水分浸潤速度と 1G 下における水平および鉛直上方浸潤速度の比較

図 2.4 丸尾（2018）および本実験の遅延係数 α

図 2.5 積算浸潤量 I と経過時間 t の関係

図 2.6 μG 下における乾いた多孔質体への水浸潤(Heinse et al., 2005).

図 2.7 落下塔による μG 実験で用いた浸潤実験装置

図 2.8 浸潤距離 L と経過時間 t の関係

図 2.9 2mmGB で観察されたジャンプ

表 2.1 多孔質体試料の粒子密度と乾燥密度

表 2.2 実験継続時間と重力レベル

第 3 章

図 3.1 通直な毛管（左）および水分移動方向に向かって径が大きくなる毛管（右）における毛管上昇

図 3.2 多孔質体粒子間に保持された水分の模式図

図 3.3 逆円錐形毛管の軸対象モデルと境界条件

図 3.4 浸潤実験装置図

図 3.5 COMSOL による間隙中の水分移動シミュレーション結果

図 3.6 粒子間距離が大きい間隙における親水条件の毛管上昇

図 3.6 粒子間の水分移動

図 3.8 液滴径ごとの 1G および μG 下における接触角（長沼ら, 2017）

図 3.9 1G および μG 下における粒子配列の違い（Reddi et al., 2005）

第 4 章

図 4.1 エタノール浸潤実験装置

図 4.2 各濃度のエタノール浸潤実験における浸潤距離 L と経過時間の平方根 $t^{0.5}$ の関係

図 4.3 浸潤速度 ε と fm および S-N number の関係

図 4.4 各濃度のエタノール浸潤実験において浸潤前線が 30 cm に到達した時点の水分分布曲線

表 4.1 実験に供試した豊浦砂の特性

表 4.2 20°C の各濃度エタノール水溶液 (AES) の物性値 (Vazquez et al., 1995)

第 5 章

図 5.1 各軸の時間平均加速度の変化

図 5.2 各軸における時間平均加速度の変化 (0G 付近の拡大図)

図 5.3 実験カラム概略図

図 5.4 実験装置概略図

図 5.5 クリノスタットによる水分浸潤実験における浸潤距離と経過時間の平方根の関係

図 5.6 豊浦砂を用いた浸潤実験における時間の経過に対する浸潤距離 (黒点) と各軸の時間平均加速度

図 5.7 関東ロームを用いた浸潤実験における時間の経過に対する浸潤距離 (黒点) と各軸の時間平均加速度

図 5.8 0.05 mm ガラスビーズを使ったクリノスタット実験と水平浸潤実験の比較

表 5.1 実験に供試した多孔質体試料の充填密度と飽和透水係数

第1章 はじめに

近年、地球外の天体において水が存在する証拠の発見が相次いでいる。木星衛星のエウロパは表面を氷で覆われた天体であり、天体磁場の解析から氷の下に海が存在する可能性を指摘されていたが (Kivelson et al., 2000)、氷の割れ目において水蒸気の噴出が観測され液状水の存在が明らかになった (Roth et al., 2014)。また、土星の衛星エンケラドスでも氷の割れ目からプルームが噴出しており、土星探査機 Cassini がプルーム中を飛行し成分を分析したところ、96 %から 99 %が水であることが明らかになった (Waite et al., 2017)。

Li et al. (2018) は近赤外光の反射スペクトル解析を行い、月極域のクレーターの永久影で地下数 mm の深さに水の氷が存在することを明らかにした。また、ESA の火星探査衛星 Mars Express は、2012 年に火星南極域において地中レーダー探査を行ない、地表付近に存在する氷の下に安定した液状水が存在することを発見した (Orosei et al., 2018)。このように、月や火星表層の水は失われてしまった一方で、地下には現在も水が存在している (Karlsson et al., 2015)。月や火星の低気圧・低湿度環境では、水は昇華してしまい、長期間存在することは難しいと考えられており (Haberle et al., 2001; Li et al., 2018)、地下の浅いところになぜ氷が存在するのか明らかではない (猿谷, 2016)。このような月や火星の水資源は、将来の有人探査の現場資源としての利用が期待されており (Li et al., 2018)、多孔質体中の水分挙動についてより詳細に明らかにする必要がある。

将来の有人探査における現場水資源の利用先として、「宇宙農業」が挙げられる。「宇宙農業」とは、長期多人数型ミッションにおいて生じる食料問題を現地で作物の自給自足を行うことで解決する生命維持システムの 1 つである。たとえば3年間のミッションでは食料だけでも宇宙飛行士 1 人あたり 15 トン必要で (北宅ら, 2016)、そのコストは地球の低空周回軌道でも \$10,000/kg、火星では \$300,000/kg (Massa et al., 2007) と見積もられており、地球からの補給に依存することは現実的ではない (Maggi et al., 2018)。そこで宇宙空間における作物栽培システムの検討が行われている (Bingham et al., 2000; Massa et al., 2017)。しかし、多孔質体培地を用いた栽培システムでは、作物根圏の水分量制御の困難さが報告されている。

宇宙ステーション Mir の小麦栽培実験では、多孔質体中の含水量をモニタリングし乾燥してきたところで注水を行う自動給水システムが採用された (Bingham et al., 2000). しかし、植物が吸水を始めると多孔質体の水分量が急速に減少し、注水量を上げても多孔質体中の含水量を上げることができなかった. 水源の水位の減少量から予想される多孔質体の含水量と実際の含水量が大きく異なり、多孔質体に水が浸み込みにくくなったことが明らかになった.

国際宇宙ステーション (ISS) で行われた VEGGIE プロジェクトでは、ロメインレタスの栽培が行われた (Massa et al., 2017). 多孔質体は水源から吸水できるように設計されていたが、5つのサンプルのうち3つのサンプルが低水分状態となった. 宇宙飛行士による強制灌水により1つのサンプルで低水分状態から回復したが、2つのサンプルのレタスは回復しなかった.

微小重力 (μG) 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 (Bingham et al., 2000). そこで本論文の第2章では、地上重力 (1G) 下と μG 下における多孔質体中の水分移動を比較することで、現在の水分移動理論の適用性について検討を行なう. また、第3章では、単一間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影響を明らかにする.

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 (長沼ら, 2017) 一方で、粘性は重力で変化することが報告されており (野川ら, 2018), 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章では浸潤溶液の物理性が水分移動に与える影響を定量するパラメータを提案し、適用性を検討する.

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 年以上行われている. 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、 μG 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 (Chau et al., 2005), 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 (Yendler et al., 1996). 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 μG 実験が必要である (Or et al., 2009). 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、 μG 下の現象の再現可能性について検討する.

引用文献

- 北宅善昭, 平井宏昭, 矢野幸子. 2016. 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. 第30回宇宙環境利用シンポジウム. 神奈川県.
- 猿谷友孝. 2016. 火星における不凍水とその役割. 地学雑誌, 125(1): pp. 49-62.
- 長沼菜摘, 佐藤直人, 丸尾裕一, 野川健人, 登尾浩助. 2017. 重力の変化が接触角に与える影響. 2017年度土壌物理学大会講演要旨集, pp. 22-23.
- 野川健人, 佐藤直人, 長沼菜摘, 丸尾裕一, 登尾浩助. (2018): 重力の変化と粘性の関係. 2018年度土壌物理学大会講演要旨集, pp. 94-95.
- Bingham, G. E., S. B. Jones, D. Or, I. G. Podolski, M. A. Levinskikh, V. N. Sytchov, T. Ivanova, P. Kostov, S. Sapunova, I. Dandolov, D. B. Bubenheim, and G. Jahns. 2000. Microgravity effects on water supply and substrate properties in porous matrix root support systems. *Acta Astronautica*, 47(11): pp.839-848.
- Chau J.F., D. Or, and M.C. Sukop. 2005. Simulation of gaseous diffusion in partially saturated porous media under variable gravity with lattice Boltzmann methods. *Water Resour. Res.* 41(8).
- Haberle, R. M., C. P. McKay, J. Schaeffer, N. A. Cabrol, E. A. Grin, A. P. Zent, and R. Quinn. 2001. On the possibility of liquid water on present - day Mars. *Journal of Geophysical Research. Planets.* 106(E10): pp. 23317-23326.
- Kivelson, M. G., K. K. Khurana, C. T. Russell, M. Volwerk, R. J. Walker, and C. Zimmer. 2000. Galileo magnetometer measurements: A stronger case for a subsurface ocean at Europa. *Science.* 289(5483): pp. 1340-1343.
- Karlsson, N. B., L. S. Schmidt, and C. S. Hvidberg. 2015. Volume of Martian midlatitude glaciers from radar observations and ice flow modeling. *Geophysical Research Letters.* 42(8): pp.2627-2633.
- Li, S., P. G. Lucey, R. E. Milliken, P. O. Hayne, E. Fisher, J. P. Williams, D. M. Hurley, and R. C. Elphic. 2018. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. *P. Natl. A. Sci. USA.* 115(36): pp. 8907-8912.
- Maggi, F., F. H. Tang, C. Pallud, and C. Gu. 2018. A urine-fuelled soil-based bioregenerative life support system for long-term and long-distance manned space missions. *Life sciences in space research*, 17: pp. 1-14.

- Massa, G. D., J. C. Emmerich, R. C. Morrow, C. M. Bourget, and C. A. Mitchell. 2007. Plant-growth lighting for space life support: a review. *Gravitational and Space Research*. 19(2): pp. 19-30.
- Massa GD, N. F. Dufour, J. A. Carver, M. E. Hummerick, R. M. Wheeler, R. C. Morrow and T. M. Smith. 2017. VEG-01: Veggie hardware validation testing on the International space station. *Open Agriculture*. 2: 33-41.
- Or D., M. Tuller, and S.B. Jones. 2009. Liquid behavior in partially saturated porous media under variable gravity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(2): pp. 341-350.
- Orosei, R., S. E. Lauro, E. Pettinelli, A. Cicchetti, M. Coradini, B. Cosciotti, F. D. Paolo, E. Flamini, E. Mattei, M. Pajola, F. Soldovieri, M. Cartacci, F. Cassenti, A. Frigeri, S. Giuppi, R. Martufi, A. Masdea, G. Mitri, C. Nenna, R. Noschese, M. Restano, and R. Seu. 2018. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. *Science*. 361(6401): pp. 490-493.
- Roth, L., J. Saur, K. D. Retherford, D. F. Strobel, P. D. Feldman, M. A. McGrath, and F. Nimmo. 2014. Transient water vapor at Europa's south pole. *Science*. 343(6167): pp. 171-174.
- Waite, J. H., C. R. Glein, R. S. Perryman, B. D. Teolis, B. A. Magee, G. Miller, J. Grimes, M. E. Perry, K. E. Miller, A. Bouquet, J. I. Lunine, T. Brockwell, and S. J. Bolton. 2017. Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: evidence for hydrothermal processes. *Science*. 356(6334): pp. 155-159.
- Yendler, B. S., B. Webbon, I. Podolski, and R. J. Bula. 1996. Capillary movement of liquid in granular beds in microgravity. *Advances in Space Research*. 18(4/5): pp. 233-237.

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

2.1 多孔質体中の水分移動理論

不飽和多孔質体中の 1 次元の水分移動は、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を駆動力として生じ、リチャーズ式によって次のように表される (Richards, 1931).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right) \quad (2.1)$$

ここで θ は体積含水率 (cm^3/cm^3), t は時間 (s), z は距離 (cm), K は透水係数 (cm/s), $\frac{\partial \psi}{\partial z}$ はマトリックポテンシャル勾配, $\frac{\partial \phi}{\partial z}$ は重力勾配である. 多孔質体中の水平流れのみを考えると, (2.1)式における重力勾配は無視できるため, 水分移動は次の式によって表される.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

水平浸潤と同様に, μG 下においても多孔質中に重力勾配が生じないと考えられるため, 水分移動は (2.2)式によって表されると考えられる. また, マトリックポテンシャルの主な要因である毛管力 Δp は次の式によって表される (Tsunazawa et al., 2016).

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \gamma}{r} \quad (2.3)$$

ここで, σ は表面張力 (N/m), γ は接触角, r は代表間隙半径 (m)であり, 通直な毛管における気液界面の圧力差を表している. 毛管力は重力項を含まない因子であり, Maruo et al. (2015) は, μG 下においても毛管力が働くことを明らかにしている. したがってマトリックポテンシャル勾配を駆動力とする水分移動は重力によって変化せず, 水平浸潤は μG 下における水分移動を適切に模擬できると考えられた (Jones and Or, 1999). しかし, Yendler et al. (1996) が 1.5 mm のガラスビーズを用いて μG 下における浸潤, 1G 下における水平浸潤および鉛直上昇浸潤実験を行なったところ, μG 下の浸潤速度が水平浸潤速度と比較して遅くなることが明らかになった. Mohamed et al. (2002) も μG 下において平均粒径 0.2 mm の土壌を用いた浸潤実験を実施し, 浸潤速度が理論値よりも低

下したと報告した。この結果から Mohamed et al. (2002) は地上で観測された保水力や透水係数は μG 下では適用できない可能性があるとして述べた。一方で Heinse et al. (2005) は航空機を放物線飛行させるパラボリックフライト実験により重力が過重力から μG に変化する際の多孔質体中の水分分布の変化を観察し、その変化がリチャーズ式による推定値と一致したと報告した。これまで地上で確立されたフラックスモデルが μG 下においても適用が可能であるかについては議論が分かれているが、地球と異なる重力下においても水分移動を調査した例は少なく、水分浸潤に対する重力の影響は明らかではない。Yendler et al. (1996) は μG 下で観察された浸潤速度の低下について、少ない実験の結果だけでは統計的な正当性が無いと述べ、より多くの μG 実験の必要性に言及している。そこで、本章ではパラボリックフライトおよび落下塔を用いた μG 下において浸潤実験を行い、多孔質体中の水分移動の重力依存性と現在の水分移動理論の適用性について検討した。

2.2 パラボリックフライトによる μG 実験

2.2.1 実験方法

航空機を放物線飛行させることにより μG 環境を作出するパラボリックフライトで μG 実験を行なった。本実験では航空機として MU-300 (Diamond Air Service Co., Ltd., Nagoya, Japan) を使用した。1 パラボリックフライト (PF) の μG 継続時間は 18 秒～20 秒程度で、3 回の μG 環境を作出し実験を行なった。各 PF の直前は 20 秒程度の 2G が、また直後には 20 秒から 30 秒程度の 1.5G がかかる過重力環境であった。飛行中の重力レベル (G) は加速度センサーによって測定した。

獲得した μG 環境下において多孔質体への水分浸潤実験を行なった。多孔質体への浸潤速度は粒度に非常に敏感である (Yendler et al., 1993)。間隙径が小さいほど重力の影響は小さくなることが明らかになっており (Or et al., 2009)、比較的粗い粒度の媒体では、薄く敷いた多孔質体の水平浸潤実験(静水圧の影響を低減する実験)でさえ、重力勾配により浸潤が速くなる可能性がある (Jones and Or, 1999)。そこで Yendler et al. (1996) が用いたガラスビーズ (粒径 1.5 mm) よりも小さい 0.4 mm のガラスビーズを用いて、 μG 下における水分浸潤を観察した。浸潤速度は接触角の変化に大きく影響を受けるため、ガラスビーズ表面の処理には特に気をつける必要がある。ガラスビーズは

Lu et al. (1994) の方法に則り、実験前に中性洗剤 (0.75 ml/L) で洗浄し蒸留水で 10 回すすぎ洗いを行なった後に 110°C で炉乾燥した。炉乾燥したガラスビーズを密閉可能なプラスチックバック内で室温まで冷やしたのち実験に使用した。油などによる汚染を防ぐため、ガラスビーズを扱う際にはゴム手袋を着用した。

ガラスビーズを表 2.1 に示す乾燥密度で多孔質体カラムに充填した。多孔質体カラムは無色透明の亚克力製の円筒型で内径 2.4 cm、高さ 13.6 cm であった。多孔質体試料の容易な吸水を可能とするため、金網 (目開き 2 mm) を綿布で覆った多孔質板をカラムの底に用いた。カラム上端は紙製のウエスを挟みゴム栓をした。ゴム栓の中心には直径 5 mm の穴を開けた。

マトリックスポテンシャル勾配のみを駆動力とする水分移動を観察するためには、多孔質体が吸水する際の水頭圧など、水源において発生する可能性のある圧力を取り除く必要がある。そのため地上における水平浸潤実験は、マリOTT管を用いて水頭圧を調整して行われる (Bruce and Klute, 1956)。しかし、 μG 下ではマリOTT管の細管における毛管力を考慮しなくてはならず、細管の毛管力による負圧が多孔質体の吸水を低下させる恐れがある。一方で重力加速度がゼロに近づく μG 下では水頭圧は考慮しなくて良い。そこで本研究では水源は直径 3.0 cm の円筒亚克力管を用いて作成した。水源に働く毛管力 Δp_{ws} に対する多孔質体中に働く毛管力 Δp_{GB} の比を (2.4) 式によって求めた。

$$\frac{\Delta p_{GB}}{\Delta p_{ws}} = \frac{r_{ws}}{r_{GB}} \quad (2.4)$$

ここで、 r_{ws} は水源の半径 (cm)、 r_{GB} は (2.4) 式を用いて求めた多孔質体の代表間隙半径 (cm) である (Arya et al., 1999)。

$$r_{GB} = 0.816R\sqrt{e} \quad (2.5)$$

ここで R は多孔質体粒子半径 (cm)、 e は間隙比である。 $\Delta p_{GB}/\Delta p_{ws} \approx 160$ であり多孔質体の毛管力は水源の毛管力に比べてはるかに大きいため水源に働く負圧の影響は無視できると考えた。水源の上部は電磁弁で閉じられており、実験中に任意のタイミングで手元のスイッチにより開閉できるようにした。パラボリックフライトでは μG の前後において 1.5G から 2G 程度の過重力環境となるため、 μG 以外の重力環境では電磁弁を閉じ水源を密閉することで浸潤を停止させた。多孔質体カラムを鉛直に設置し、水源と接続した。実験装置図を図 2.1a に示す。浸潤溶液として上空における機内の気圧低下によって溶存気体が気泡として出ることを防ぐため脱気水を用いた。

実験の開始前に多孔質体の下端から 1.5 cm 程度の高さまで水分を押し込み、水源と多孔質体の水を連続させた。重力が μG になる 1 分 30 秒前からパイロットによりカウントダウンが開始され、「1 分前」、「30 秒前」、「10 秒前」がコールされた。重力が μG となり「now」がコールされた後、電磁弁を開放した。20 秒程度の μG 環境の後、重力が復帰するのを感じたらただちに電磁弁を閉じ、浸潤を停止させた。多孔質体中の水位の変化はビデオカメラ (GoPro Hero5, GoPro 社)(60 fps) で撮影した。得られた動画から抽出した画像の画像解析により浸潤距離を測定し、浸潤速度を計算した。

μG 下における浸潤速度と比較するため、1G 下において水平浸潤実験を行なった。多孔質体試料として μG 実験で用いたものと同じ 0.4 mm のガラスビーズを使用した。表 2.1 に示した乾燥密度でガラスビーズを充填し、水平にカラムを設置した。空気抜きシリンジを多孔質体と水源の間に接続した。水源にはマリOTT管を用いた。マリOTT管のチューブの下端をカラムの中心高さと揃えることで水頭圧の影響を無視した(図 2.1b)。浸潤前線の変位をビデオカメラ (GoPro Hero5, GoPro 社) で撮影し、画像解析により浸潤距離を評価した。

鉛直上方浸潤実験では、0.4 mm のガラスビーズを表 2.1 に示した乾燥密度でカラムに充填し鉛直に設置した。水源のマリOTT管のチューブ下端を多孔質体の下端高さと揃えた(図 2.1c)。他の実験と同様に、水位の変化から浸潤速度の計算を行なった。

2.2.2 結果と考察

実験飛行中の重力レベルの変化を図 2.2 に示す。実験飛行中に 3 回の放物線飛行 (PF) を行い、それぞれ 20 秒程度の μG 環境を得た (PF1-3)。 μG 下において電磁弁を開放した時間はそれぞれ、PF1 では 9 秒、PF2 および PF3 では 16.5 秒であり、合計で 42 秒間の水分浸潤を観察した。それぞれの PF における重力レベルを表 2.2 に示す。PF1 と PF2 の最大重力レベル (G_{max}) は最小重力レベル (G_{min}) と比べて平均重力レベル (G_{average}) との差が大きかった。これは μG 後の重力復帰期間が電磁弁開放中の最後に 1 秒程度含まれたためである。 G_{average} は全ての PF において 10^{-3}G のオーダーを達成しており、標準偏差の値から、浸潤の最後の 1 秒程度を除けば、 10^{-2}G のオーダーで μG 環境を達成したと考えられる。

1G 下における水平浸潤実験 (白丸) と鉛直上方浸潤実験 (黒丸)、および μG 実験 (PF1:青四角, PF2:緑菱形, PF3:赤三角) における各浸潤速度を図 2.3 に示す。重力

勾配の無視できる条件下における浸潤は Lucas–Washburn 式によって (2.6)式のように表され (Washburn, 1921), 浸潤距離 L が経過時間 t の平方根に比例する.

$$L = \sqrt{\frac{\sigma r \cos \gamma}{2\eta} t} \quad (2.6)$$

ここで, σ は表面張力 (N/m), γ は接触角, η は粘性 (Pa s) である. 1G 下における水平浸潤と μG 下における浸潤では, 浸潤距離が時間の平方根に比例し, (2.6)式の関係が確認された. リチャーズ式によれば, μG 下の浸潤も 1G 下における水平浸潤も重力勾配が無視できる条件下における浸潤であり, 両者の浸潤速度は一致すると考えられた. しかし本実験において, μG 下における浸潤速度は 1G 下における水平浸潤速度よりもわずかに小さかった. 丸尾 (2018) は (2.6)式で表される浸潤について, 浸潤速度の低下を定量する遅延係数 α を次式によって提案した.

$$\alpha = \frac{\frac{dL_{\mu g}}{d\sqrt{t}}}{\frac{dL_{1g}}{d\sqrt{t}}} \quad (2.7)$$

ここで $L_{\mu g}$ および L_{1g} はそれぞれ μG および 1G における浸潤距離であり, α が小さいほど浸潤速度が大きく低下したことを意味する. 丸尾 (2018) が $r = 0.4 \text{ mm}$ から 2.8 mm の毛管を用いて行なった水分浸潤実験では, α は 0.56 から 0.64 の値であった. 丸尾 (2018) および本実験の α を図 2.4 に示す. 本実験における $\alpha (=0.84)$ は丸尾 (2018) の α よりも大きな値であったが, 本実験で用いた多孔質体の代表間隙半径が 0.1 mm であり, 遅延係数と間隙径の間には負の相関があるように見えた. その理由については明らかでないが, 丸尾 (2018) はこのような大きな α を高い粘性の浸潤溶液 (40%エタノール水溶液) を用いた浸潤で確認しており, 高い粘性や小さい間隙径によるゆっくりとした浸潤では α が大きくなる可能性がある.

Yendler et al. (1996) は宇宙ステーション Mir において, 粒径 1.5 mm のガラスビーズを用いて水分浸潤実験を実施し, 浸潤のしやすさを表す指標であるソープティビティを用いて地上における水平浸潤との比較を行った. Philip (1957) は 1G 下の下方浸潤についての浸潤理論式をソープティビティを用いて次のように提案した.

$$I = S_p t^{0.5} + At \quad (2.8)$$

ここで I は積算浸潤量 (cm), S_p はソープティビティ ($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$), t は時間 (min), A は透水係数などから計算される係数である (宮崎ら, 2005). 右辺第二項の At は水平浸潤や μG 下の浸潤の場合には無視できる (Jones and Or, 1999) ので (2.8)式は

$$I = S_p t^{0.5} \quad (2.9)$$

と書くことができる．この (2.9)式を用いて Yendler et al. (1996) の結果をフィッティングするとソーブティビティ S_p は μG 下における浸潤で $0.8 \text{ cm}/\text{min}^{0.5}$, 1G 下における水平浸潤で $2.5 \text{ cm}/\text{min}^{0.5}$ であり (Jones and Or, 1999), 1G 下における S_p が μG 下における S_p を 3 倍以上上回った．

本実験の粒径 0.4 mm のガラスビーズの S_p を算出するため，積算浸潤量 I を計算した．浸潤前線より後方は飽和と仮定できる (宮崎ら, 2005) ので，各時間における積算浸潤量 $I(t)$ は

$$I(t) = L(t) * n \quad (2.10)$$

によって計算できる．ここで $L(t)$ はある時間 t の浸潤距離 (cm), n は間隙率 (cm^3/cm^3) である．積算浸潤量 I と時間の平方根 $t^{0.5}$ の関係を図 2.5 に示した． 1G 下の水平浸潤は $S_p = 3.06 \text{ cm}/\text{min}^{0.5}$ であったのに対して μG 下の浸潤は $S_p = 2.63 \text{ cm}/\text{min}^{0.5}$ であり，14%程度低下した．しかしその低下量は 68 %低下した Yendler et al. (1996) の結果を大きく下回った．ガラスビーズ多孔質体を用いた Yendler et al. (1996) および本実験の結果は， μG 下における浸潤速度の低下量には粒径，すなわち間隙径が大きく関わっていることを示唆している．

2.3 浸潤初期の水分移動速度

2.3.1 浸潤速度の低下と気相の捕獲

μG 下において浸潤速度が低下した原因として，浸潤領域に気相が保持されたことで透水性が低下した可能性が指摘されている (Jones and Or., 1999). Heinse et al. (2005) は粒径 $1\text{--}2 \text{ mm}$ の粒子から構成された土壤材料 Turface を用いて μG 下における水分浸潤実験を行なった (図 2.6). Turface 中の水分移動では選択流が発生し，浸潤完了部に気相が捕捉されてしまう「乾燥ポケット」が観察された． μG 下の浸潤において顕著に現れるこのような乾燥ポケットの存在によって，不飽和多孔質体中の水分移動が変化する (Or et al., 2009) と考えられる．乾燥ポケットは浸潤の進行にともなって増加し (Heinse et al., 2005), 乾燥ポケットの増加にともなって浸潤も変化すると考えられる． μG 下において浸潤速度が低下した原因が乾燥ポケットの出現にともなう透水性の低下と仮定すると，乾燥ポケットが出現していない期間，すなわち浸潤の極めて初期におい

ては実測値が理論値に適合すると考えられる。そこで本実験では、浸潤の極めて初期における浸潤速度を測定し、理論値との比較を行った。

2.3.2 実験方法

自由落下によって μG 環境を得る落下塔コスモトローレ (HASTIC, 北海道赤平市) を用いて μG 実験を行った。45 m の自由落下により、2.8 秒の μG 環境を得た。多孔質体 (粒径 1 mm および 2 mm のガラスビーズ (GB)) を鉛直に設置したカラム (内径 24 mm, 長さ 200 mm) に充填した (図 2.7)。多孔質体は中性洗剤 (0.75 mL/L) で洗浄後、蒸留水で 10 回すすぎ風乾したものをを用いた。粒子密度 ρ_s は 2.49 g/cm^3 であり、乾燥密度 ρ_b は 1.56 g/cm^3 に調整し充填した。浸潤溶液には蒸留水を用いた。ガラスビーズと蒸留水の接触角 γ は 粒径 2 mm のガラスビーズ (2mmGB) では 0.384° , 粒径 1 mm のガラスビーズ (1mmGB) では 0.911° であった。1G 下で水位が安定したのを確認した後、45 m の高さから実験装置が入ったカプセルを自由落下させ、ガラスビーズ内の水位変化をビデオカメラ (GoPro Hero4, GoPro 社) で撮影した。得られた映像から画像解析ソフト ImageJ (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>) を用いて水面の位置を特定し、経時的な水位の変化を調べた。浸潤速度の理論値は (2.6)式から求め、実測値と比較した。

2.3.3 結果と考察

経過時間と浸潤距離の関係を図 2.8 に示す。どちらの試料においても、 μG 下において鉛直上方浸潤が観察されたが、特に 1mmGB において実測値が理論値とよく一致した。2mmGB の水分上昇速度は浸潤前半 (0 s – 1.2 s) において理論値よりも小さい値であったが、浸潤後半 (1.7 s – 2.7 s) において瞬時に水分上昇が起こる“ジャンプ”と呼ばれる現象が確認され、浸潤距離が理論値と一致した。“ジャンプ”とは Lu et al. (1994) によって 1G 下において確認された瞬間的な粒子の取り込みによる水分移動である。 μG 下において 2mmGB で確認された“ジャンプ”の様子を図 2.9 に示す。1.5 s から 1.6 s の間では水位の変化がほとんど見られなかったのに対して、その直後の 0.1 s の間に瞬間的な水分上昇が起こったことが分かる。Lu et al. (1994) は特に初期乾燥状態において、隙隙のくびれを通過する際に“ジャンプ”による水分移動が起こると報告しており、また“ジャンプ”による粒子の取り込みは、隣接する粒子の中で小さいものから選

挾的に起こると述べている。以上の結果から、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すること、また μG 下においても粒径が大きい多孔質体ではジャンプによる水分移動が起こることが明らかになった。

2.4 まとめ

本章では多孔質体中の水分移動の重力依存性と現在の水分移動理論の適用性について検討するため μG 下における浸潤実験を行った。0.4 mm のガラスビーズを用いて μG 下において 42 秒間の浸潤を観察した実験では、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先行研究 (Yendler et al., 1996) の低下量よりも小さかった。また、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 μG 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。

気相の捕捉(乾燥ポケット)が浸潤速度の低下の原因 (Jones and Or, 1999) である可能性があることから、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いて多孔質体中の水分移動を観察した。1mmGB を用いた実験では実測値と理論値が一致し、浸潤の極めて初期において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、2mmGB では、部分的に”ジャンプ”と呼ばれる瞬間的な水分移動を観察した。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、 μG 下における水分移動を明らかにするには単一間隙内の水分挙動についても検討する必要がある。

リチャーズ式の重力依存パラメータは重力項のみであるが (Jones et al., 2012), μG 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。したがって、透水係数が重力や時間に依存して変化する可能性を考えに含めた理論の見直しが必要である。

引用文献

- 丸尾裕一. 2018. 毛管力の重力依存性と微小重力実験装置の開発. 明治大学大学院農学部農学研究科修士論文. (未発表)
- 宮崎毅, 長谷川周一, 粕渕辰昭. 2005. 土壌物理学, pp. 138. 朝倉書店, 東京.
- Arya L.M., F.J. Leiji, M.T. van Genuchten, and P.J. Shouse. 1999. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(3): pp. 510-519.
- Bruce, R. R., and A. Klute. 1956. The Measurement of Soil Moisture Diffusivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 20(4): pp. 458-462.
- Heinse, R., S.D. Humphries, R.W. Mace, S.B. Jones, S.L. Steinberg, M. Tuller, R.M. Newman, and D. Or. 2005. Measurement of porous media hydraulic properties during parabolic flight induced microgravity No. 2005-01-2950. SAE Technical Paper.
- Jones, S. B. and D. Or. 1999. Microgravity effects on water flow and distribution in unsaturated porous media: Analyses of flight experiments. *Water resources research.* 35(4): pp.929-942.
- Jones, S.B., D. Or, R. Heinse, and M. Tuler. 2012. Beyond Earth: Designing Root Zone Environments for Reduced Gravity Conditions. *Vadose Zone Journal.* 11(1).
- Lu, T. X., J.W. Biggar, and D.R. Nielsen. 1994. Water movement in glass bead porous media: 1. Experiments of capillary rise and hysteresis. *Water Resources Research.* 30(12): pp. 3275-3281.
- Maruo, Y., N. Sato, R. Nagura, R. Kamide, and K. Noborio. 2015. Water movement in capillary tubes under microgravity. The joint conference of 6th international symposium on physical science in space and 10th international conference on two-phase systems for space and ground applications.
- Mohamed, A.M.O., H.E. Antia, and R.G. Gosine. 2002. Water flow in unsaturated soils in microgravity environment. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.* 128(10): pp. 814-823.
- Or D., M. Tuller, and S.B. Jones. 2009. Liquid behavior in partially saturated porous media under variable gravity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(2): pp. 341-350.
- Philip, J. R. 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil science.* 83(5): pp. 345-358.

- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. 1(5): pp. 318-333.
- Tsunazawa, Y., T. Yokoyama, and N. Nishiyama. 2016. An experimental study on the rate and mechanism of capillary rise in sandstone. *Progress in Earth and Planetary Science*. 3(8).
- Washburn, E.W. 1921. The dynamics of capillary flow. *Physical review*. 17(3): pp. 273-283.
- Yendler, B., and B. Webbon. 1993. Capillary movement of liquid in granular beds. SAE Technical Paper. No. 932164.
- Yendler, B. S., B. Webbon, I. Podolski, and R. J. Bula. 1996. Capillary movement of liquid in granular beds in microgravity. *Advances in Space Research*. 18(4/5): pp. 233-237.

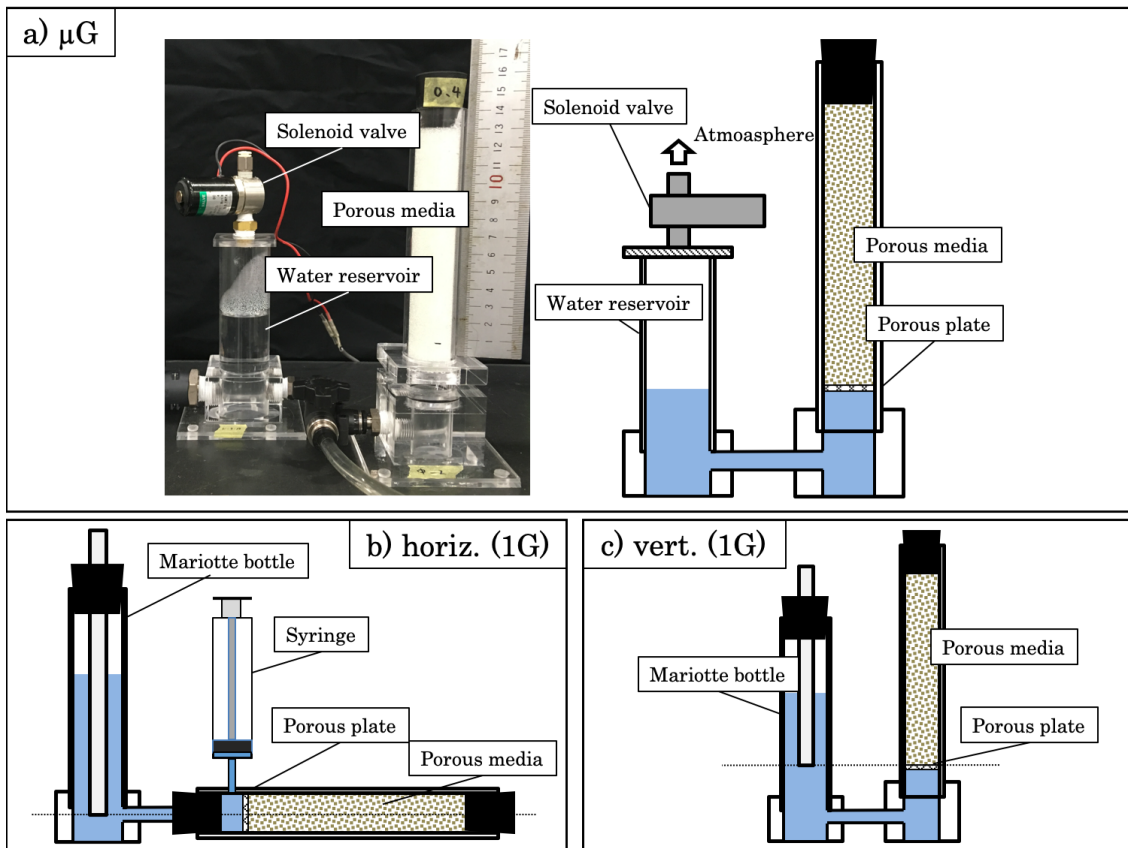


図 2.1 浸潤実験装置. a) μG 下における水分浸潤実験装置の写真(左)と模式図(右), b) 1G 下における水平浸潤実験(horiz. 1G)で用いた装置模式図. マリOTT管のチューブ下端を多孔質体の中心と揃えることで, 水頭圧の影響を無視した. c) 1G 下における鉛直上方浸潤実験(vert. 1G)で用いた装置模式図. 多孔質体の下端にかかる水頭圧をゼロにするため, マリOTT管のチューブ下端の高さを揃えた. 鉛直上方浸潤実験では水源と多孔質体との間の空気をシリンジ等で抜かなくても, チューブ下端まで自動的に水位が上昇し, 多孔質体と接触することで浸潤が開始された.

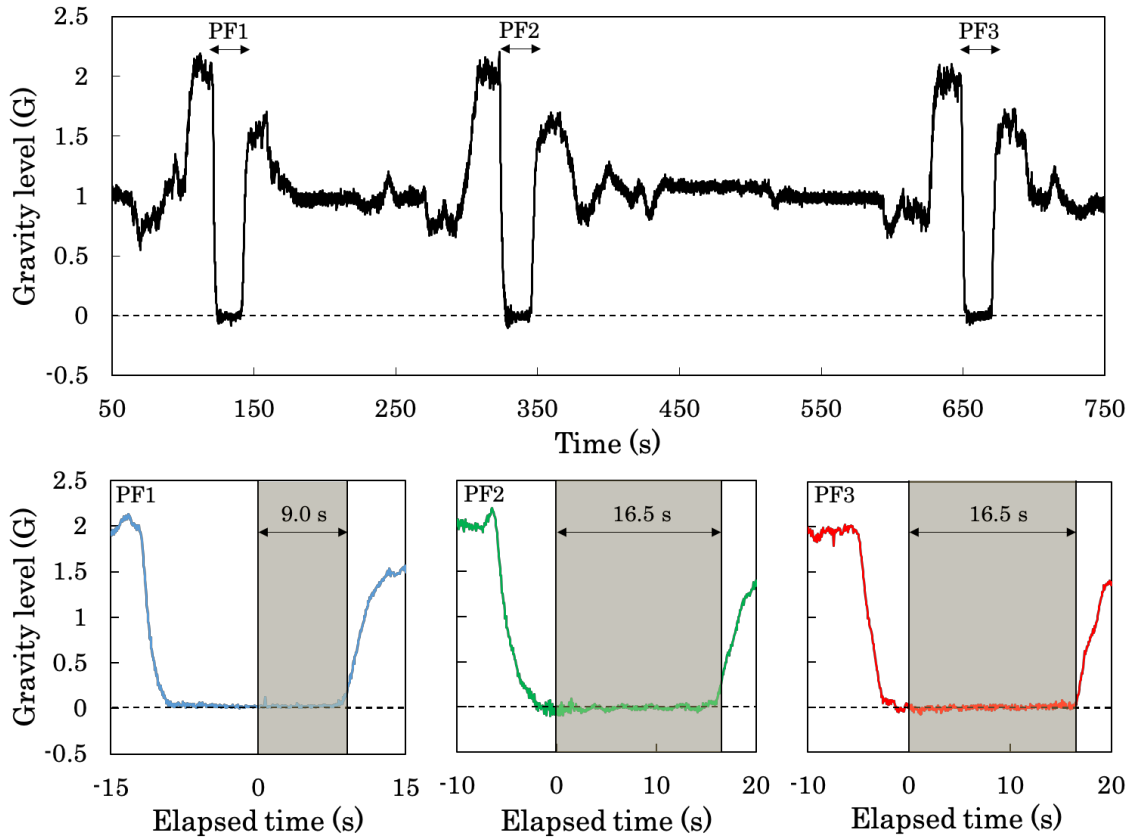


図 2.2 実験飛行中の重力変化(上)と, それぞれの放物線飛行(PF)における重力変化(下). 網掛け部分は電磁弁を開放していた期間を示す. 下段の横軸には電磁弁が解放され浸潤が開始した時間を 0 s とした経過時間を示してある.

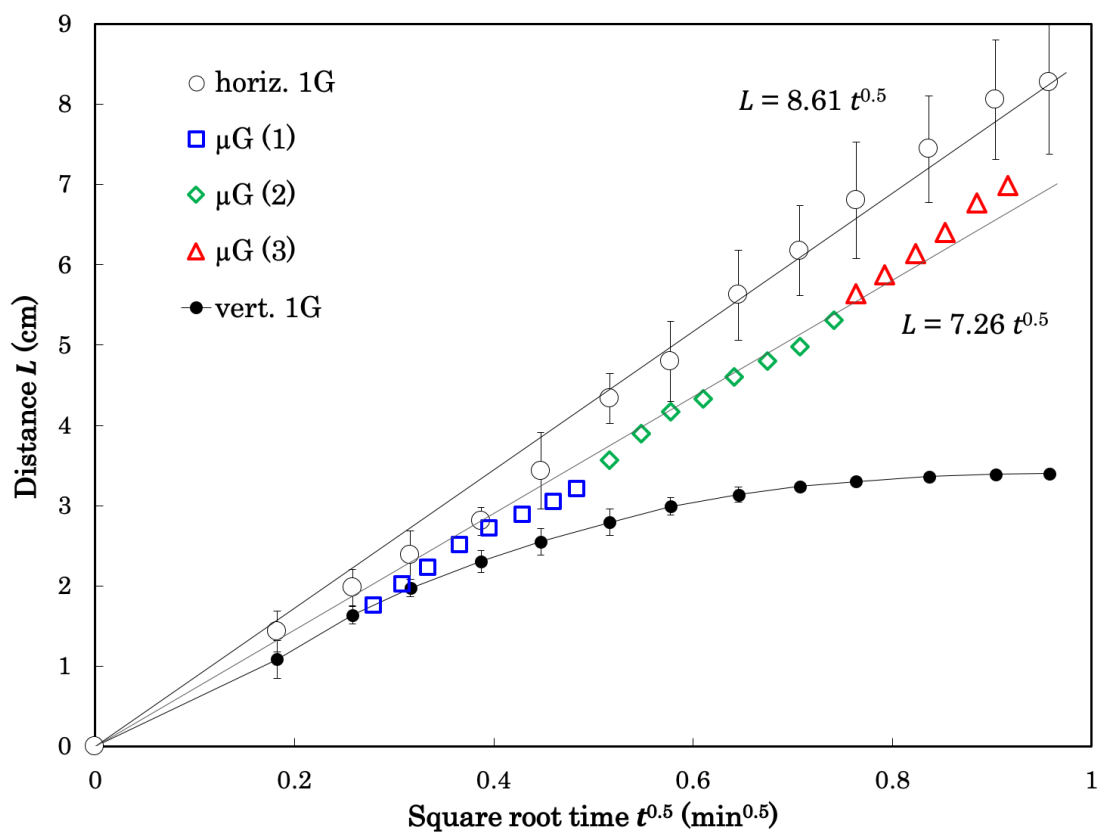


図 2.3 μG 下における水分浸潤速度と 1G 下における水平および鉛直上方浸潤速度の比較

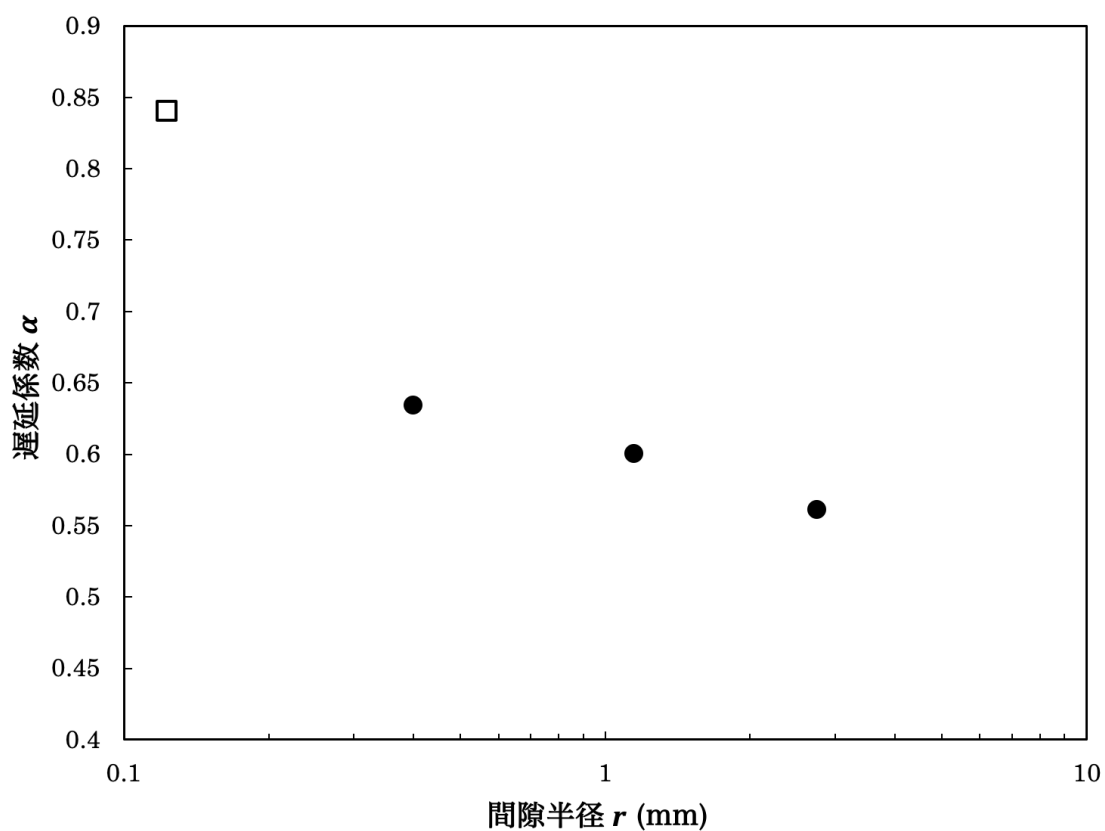


図 2.4 丸尾 (2018) および本実験の遅延係数 α . 黒丸●: 丸尾 (2018) の毛管半径 0.4 mm から 2.8 mm の毛管における遅延係数 α . 四角□: 本実験で行なった 0.4 mm ガラスビーズの遅延係数 α .

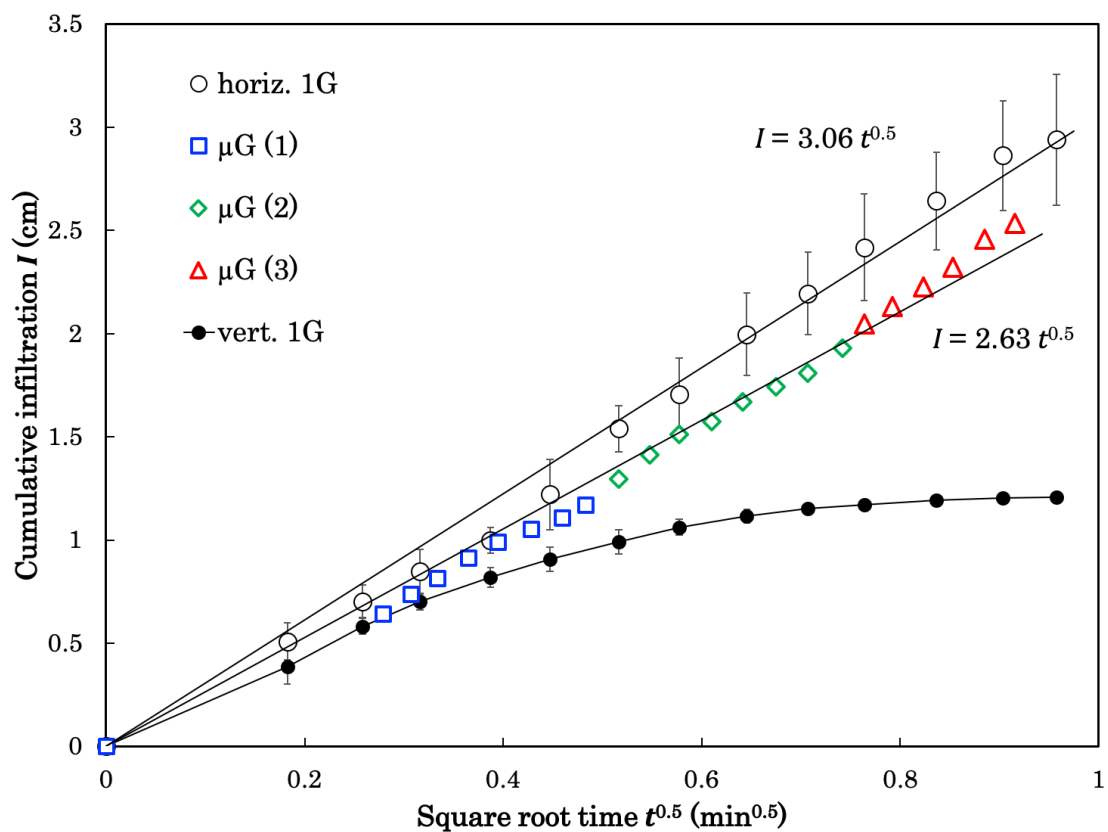


図 2.5 積算浸潤量 I と経過時間 t の関係. 1G 下における水平浸潤(horiz. 1G)と μ G 下における浸潤(μ G (1) – (3))の近似直線の傾きはソープティビティ S_p を表し, それぞれ $S_p = 3.06$ (horiz. 1G), $S_p = 2.63$ (μ G) であった.

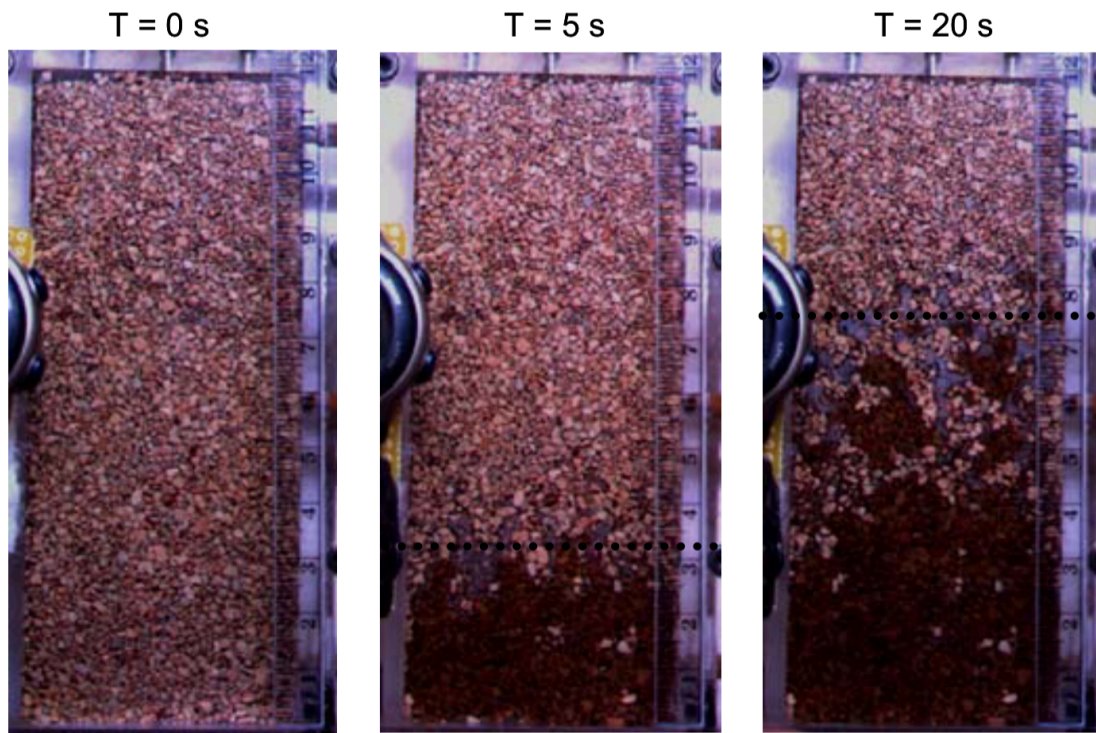


図 2.6 μG 下における乾いた多孔質体への水浸潤(Heinse et al., 2005). 浸潤の進行にともなって浸潤完了部に気相が捕捉され, 乾燥ポケットが形成された.

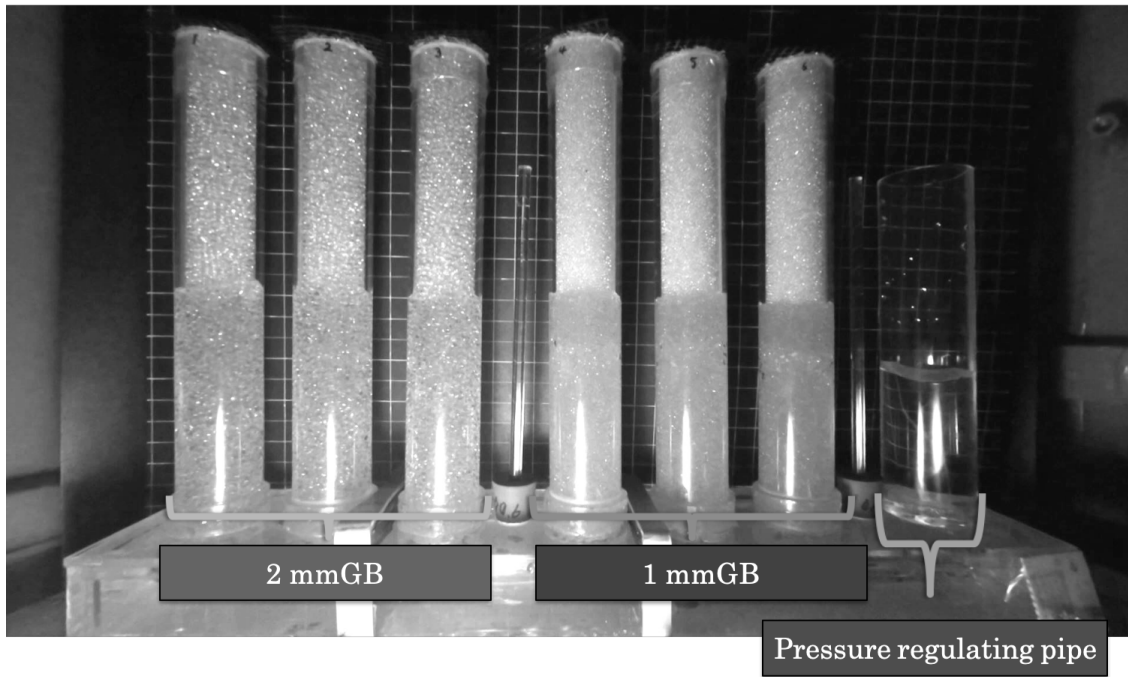


図 2.7 落下塔による μG 実験で用いた浸潤実験装置

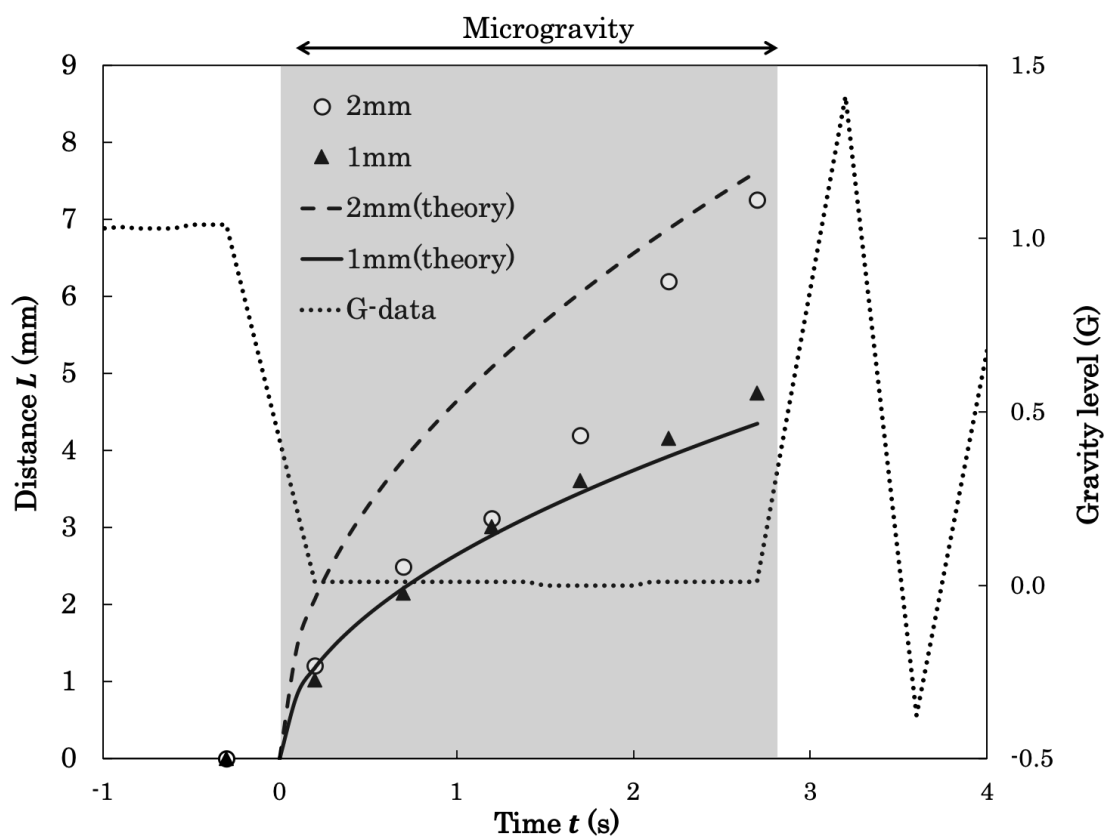


図 2.8 浸潤距離 L と経過時間 t の関係. 重力レベル (点線), 理論値 (破線: 2mmGB, 実線: 1mmGB) および実測値 (黒丸: 2mmGB, 三角: 1mmGB)である.

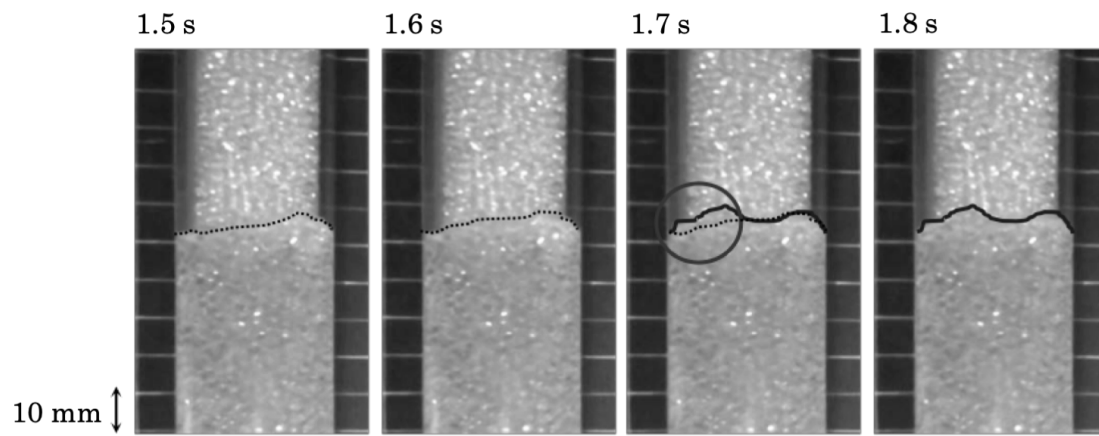


図 2.9 2mmGB で観察されたジャンプ

表 2.1 多孔質体試料の粒子密度と乾燥密度.

	Average \pm SD		
	horiz. (1G)	vert. (1G)	μ G
Particle density (N = 3) (g/cm ³)	2.50 \pm 0.00	2.50 \pm 0.00	2.50 \pm 0.00
Bulk density (g/cm ³)	1.61 \pm 0.01 (N = 3)	1.61 \pm 0.01 (N = 3)	1.59 (N = 1)

表 2.2 実験継続時間と重力レベル.

		PF1	PF2	PF3	
実験継続時間	(s)	9.0	16.5	16.5	
重力レベル	G_{\min}	(G)	-0.085	-0.093	-0.081
	G_{\max}	(G)	0.159	0.242	0.081
	G_{average}	(G)	0.007	-0.002	-0.003
	標準偏差		0.036	0.041	0.023

第3章 間隙内の水分挙動

3.1 巨視的水分挙動と微視的水分挙動

1G 下にくらべて μG 下において浸潤速度が低下したことから、リチャーズ式の重力項以外のパラメータ、すなわちマトリックポテンシャルや透水係数が重力によって変化した可能性がある。マトリックポテンシャルの主な要因は毛管力 Δp であり、(3.1)式によって表される (Tsunazawa et al., 2016).

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos\gamma}{r} \quad (3.1)$$

ここで σ は表面張力 (N/m), γ は接触角, r は代表間隙径 (m) であり、通直な毛管における気液界面の圧力差を表している。毛管力の大きさは表面張力や接触角に支配され、通直な毛管では $\Delta p > 0$ のとき水位が上昇し、 $\Delta p < 0$ では水位が低下する。水の表面張力について 1G と μG で比較が行われた例は無いが、例えば金については変化しないことが報告されている (Egry et al., 1995)。また、小さい気液界面における接触角の変化は小さく (長沼ら, 2017)、流体特性に与える影響を推定するのは困難 (Jones and Or, 1999) とされている。しかし、Heinse et al. (2007) が、 μG 下で測定した水分特性曲線の形状は 1G とは明らかに異なり、マトリックポテンシャルが変化したようであった。Heinse et al. (2007) はこの原因をテンシオメーターと多孔質体の接触具合や、微小な間隙形状な変化によるものと述べた。

現在の水分移動理論は多孔質体を (3.1)式によって表されるような通直な毛管の集合体と仮定している (登尾・溝口, 2008)。しかし、実際の多孔質体中の間隙は通直ではなく、屈曲、分岐、合流、拡張、収縮を繰り返す複雑な形状である。このような複雑な形状の間隙内で起こる微視的な水分挙動の変化は巨視的水分挙動を大きく変化させる可能性が指摘されおり (たとえば Or et al., 2009)、宇宙では通直な毛管の集合体と仮定した単純化モデルが有効ではない可能性がある (Podolsky and Mashinsky, 1994)。

丸尾ら (2016) は複雑な間隙を模擬した様々な形状の毛管を用いて、 μG 下における毛管上昇を観察し、管径が浸潤方向に向かって急に大きくなる毛管では水分移動が阻害されたことを報告した。水分移動方向に向かって管径が大きくなるような毛管 (図 3.1) において気液界面に働く圧力差 Δp は (3.1)式より

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos(\gamma + \xi)}{r} \quad (3.2)$$

と表される。ξは毛管の壁の傾き (°)である。Δp > 0 となり水位が上昇するためには γ+ξ < 90°であることが条件となる。豊浦砂やガラスビーズのような球形の粒子で構成される多孔質体の間隙 (図 3.2) も同様に、浸潤方向にむかって徐々に管径が大きくなる。このような間隙において水分移動は Δp = 0, すなわち γ+ξ = 90°となる水位 h で停止すると予想される。このような一つの間隙 (single pore) における水分移動を観察するため、COMSOL を用いたシミュレーションと浸潤実験を行なった。

3.2 実験方法

3.2.1 数値シミュレーション

本実験では COMSOL Multiphysics software (COMSOL, Inc.) の CFD モジュールに含まれるレベルセット法により気液界面の移動を計算した。レベルセット法は非混和性の 2 相流の自由表面流解析に理想的な界面追跡法である (Bashir et al., 2011)。高さ 1.5 mm, 直径 0.1 mm の円筒形水源に取り付けられた、上に向かって径が大きくなる逆円錐形の毛管モデル (図 3.3a) を作成した。球状粒子壁面に沿った界面移動を観察するため、円錐の壁面は曲率半径 R = 0.5 (mm) の曲線とした。毛管の出口には球状粒子 (R = 0.5) を配置した。初期界面 (水源の上端) から粒子壁までの距離 D は 0.2 mm とした。初期界面から間隙が最も細いくびれまでの距離 (初期水位 h_i) を 0.2 mm とした。水源および間隙は軸対象の図形なので、2 次元モデル (図 3.3b) の回転体として計算を行なった。始めに水源に水 (water), 毛管に空気 (air) を充填した。なお、これらの 2 流体はお互いに不溶とした。水が自由に水源に流れ込めるように、境界条件として流入口に静水圧 $p = \rho g z$ を与えた。ここで、ρ は水の密度 (Mg/m³), g は重力加速度 (m/s²), z は水源の上端をゼロとした上向き正の座標である。対称軸, 流入口, 流出口を除いた固体壁はウェットウォールに設定した。ウェットウォール条件では壁面の法線方向の速度成分がゼロに設定され、ウェットウォールに接触した水が壁に沿って進むことによって気液界面の形状が変化し、生じた圧力差によって気液界面が上昇する。接触角 γ には γ = 22.5° (親水条件) および γ = 45° (撥水条件) を用いた。0.25・10⁻⁴秒間隔で 1.0・10⁻³秒間計算を実施し、気液界面の変異を観察した。追加実験では粒子間距離の影響を明らかにするため、親水条件において初期界面から粒子壁までの距離 D を 0.29 mm

として、 $0.25 \cdot 10^{-4}$ 秒間隔で $3.3 \cdot 10^{-2}$ 秒間計算を実施した。

3.2.2 単層多孔質体中の界面移動観察

粒子間の水分移動を観察するため水平浸潤実験を行なった。2 mm のガラスビーズをアクリル板で挟むように配置し、一層の多孔質体（幅 2.3 cm, 高さ 14.0 cm）を製作した。ガラスビーズは親水的無処理（ $\gamma = 23.3^\circ$ ）および撥水加工処理（ $\gamma = 62^\circ$ ）を用いた。多孔質体を水平に設置し、一端からマリオット管を接続した。マリオット管のチューブの下端は多孔質体の高さと同様とした。多孔質体の下方から LED ライトで光を当て、上方からハイスピードカメラ（RX10M4, SONY）（960 fps）で撮影した。LED ライトと多孔質体の間にはライトディフューザーとしてトレーシングペーパーを敷いた。実験装置図を図 3.4 に示す。浸潤溶液として蒸留水をメチレンブルー（100 nmol/L）で染色して用いた。浸潤の開始時に、多孔質体の先頭の数層に呼び水を指すため、シリンジによる注水を行った。その後マリオット管から給水を行い気液界面の移動を観察した。

3.3 結果

3.3.1 COMSOL によるシミュレーション

親水条件（図 3.5a–e）および、撥水条件（図 3.5f–j）のシミュレーション結果を示す。親水的な無処理において気液界面は徐々に速度を落としながら進行した（図 3.5a–d）。界面が毛管の出口に配置された粒子に接触した瞬間に次の間隙に向かって急速に進行した（図 3.5e）。親水性多孔質体の間隙内では浸潤の減速と加速を繰り返しながら水分移動が進行すると考えられる。一方で撥水条件では僅かな水分上昇（図 3.5f–i）の後、 $z = 0.15$ となる高さで界面移動が停止した。界面移動が停止する高さ H を次式によって計算した。

$$H = h - h_i \quad (3.3)$$

$$h = R \cos \gamma \quad (3.4)$$

H は親水条件のとき 0.26, 撥水条件のとき 0.15 であり、 $D > H$ となる撥水条件では界面移動が停止した。親水条件では浸潤可能な形状の間隙も、撥水条件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は停止する。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。一方で粒子間距離もまた浸潤の可否を支配する要因である。D = 0.29 のときの親水条件における毛管上昇を図 3.6 に示す。気液界面は 0.027 秒後に $z = 0.26$ となる高さで停止し浸潤が阻害された。親水条件であっても粒子間距離が大きい場合にはその間隙は浸潤阻害間隙として働いた。このような粒子間距離の変化による単一間隙中の浸潤の変化は、多孔質体中の水分移動が浸潤溶液の物理性 (i.e. 接触角) の変化だけではなく微小構造のわずかな変化によっても大きく変化することを示唆している。

3.3.2 水平浸潤における界面移動観察

ある間隙の最も細い箇所 (くびれ) に気液界面が到達したときを 0 s として 0.145 秒間の界面移動を図 3.7 に示した。親水的無処理 (hydrophilic) では、0.109 s まで徐々に速度を落としながら浸潤が進行した (図 3.7a–d)。0.109 s から 0.145 s の間に界面が次の粒子に接触し、界面が隣のくびれに瞬間的に移動した (図 3.7d–e)。このとき、浸潤が停止していたとなりの間隙における気液界面の位置も瞬間的に変化した。撥水处理 (hydrophobic) では、0.072 s までわずかな界面移動が確認されたが、その後界面移動が停止し、この間隙において浸潤が阻害された。

3.4 考察

接触角の増加または粒子間距離の増加によって、単一間隙中において水分移動が停止するようになることが明らかになった。Sell et al. (1984) は μG 下において接触角を増加することを述べた。 μG 下で接触角が増加すれば浸潤が阻害される間隙が増加すると予想される。一方で、長沼ら (2017) は様々な大きさの液滴の接触角を 1G および μG 下で測定した。大きい液滴では 1G 下における接触角に対して μG 下における接触角が大きかったが、液滴径の減少にともなって 1G と μG の接触角の差が縮小した (図 3.8)。このことから小さな液滴界面では 1G と μG の接触角の差は小さくなると考えられ、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。

Reddi et al. (2005) は μG 下で間隙中の粒子接点に保持される細孔液滴小塊の大きさを調査した。細孔液滴小塊の大きさは μG 下でほとんど変化しなかったが、多孔質体

の体積の増加が観察された。Reddi et al. (2005) は μG 下で粒子の配列が変化し、粒子同士の距離が大きくなると述べた (図 3.9)。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 (図 3.9a)。ところが μG 下で重力による押し付けから解放されると粒子同士の距離が大きくなる可能性がある (図 3.9b)。このような粒子配列の変化は間隙径分布や水の連続性に影響を与えるかもしれない (Steinberg et al., 2005)。本実験では $\gamma + \xi = 0$ となる高さ h より近い位置に次の粒子が存在したとき次の間隙に気液界面が進行した。しかし、低重力下において粒子同士の距離が離れると浸潤を阻害する間隙が増加し水分移動を低下させる可能性がある。

引用文献

- 長沼菜摘, 佐藤直人, 丸尾裕一, 野川健人, 登尾浩助. 2017. 重力の変化が接触角に与える影響. 2017 年度土壤物理学大会講演要旨集, pp. 22-23.
- 登尾浩助, 溝口勝. 2008. 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. *Space Utilization Research*. 24: pp.362-363.
- 丸尾裕一, 佐藤直人, 登尾浩助. 2016. 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 土壤水分ワークショップ論文集. pp. 4-7.
- Bashir, S., J.M. Rees, and W.B. Zimmerman. 2011. Simulations of microfluidic droplet formation using the two-phase level set method. *Chemical Engineering Science*. 66(20): pp. 4733-4741.
- Egry, I., G. Lohoefer, and G. Jacobs. 1995. Surface tension of liquid metals: results from measurements on ground and in space. *Physical review letters*, 75(22): pp. 4043-4046.
- Heinse, R., S. B. Jones, S. L. Steinberg, M. Tuller, and D. Or. 2007. Measurements and modeling of variable gravity effects on water distribution and flow in unsaturated porous media. *Vadose Zone Journal*, 6(4): pp. 713-724.
- Jones, S. B. and D. Or. 1999. Microgravity effects on water flow and distribution in unsaturated porous media: Analyses of flight experiments. *Water resources research*. 35(4): pp.929-942.
- Or D., M. Tuller, and S.B. Jones. 2009. Liquid behavior in partially saturated porous media under variable gravity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(2): pp. 341-350.
- Podolsky, I., and A. Mashinsky. 1994. Peculiarities of moisture transfer in capillary-porous soil substitutes during space flight. *Advances in Space Research*. 14(11): pp. 39-46.
- Reddi, L. N., M. Xiao, and S.L. Steinberg. 2005. Discontinuous pore fluid distribution under microgravity-KC-135 flight investigations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69(3): pp. 593-598.
- Sell, P. J., E. Maisch, and J. Siekmann. 1984. Fluid transport in capillary systems under microgravity. *Acta Astronautica*. 11(9): pp. 577-583.
- Steinberg, S. L., S.B. Jones, M. Xiao, L. Reddi, G. Kluitenberg, D. Or, I. Alexander, N. Daidzic, and M. Tuller. 2005. Challenges to understanding fluid behavior in plant growth media under microgravity. *SAE Technical Paper*. No. 2005-01-2947.

Tsunazawa, Y., T. Yokoyama, and N. Nishiyama. 2016. An experimental study on the rate and mechanism of capillary rise in sandstone. *Progress in Earth and Planetary Science*. 3(8).

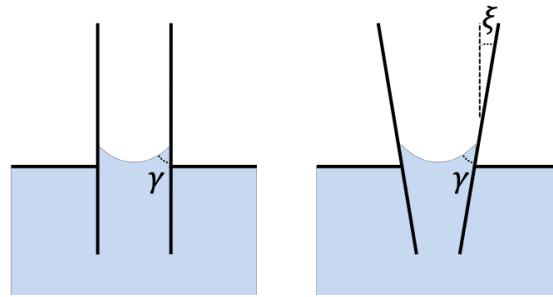


図 3.1 通直な毛管（左）および水分移動方向に向かって径が大きくなる毛管（右）における毛管上昇. γ : 接触角 ($^{\circ}$), ξ : 毛管壁の傾き ($^{\circ}$)

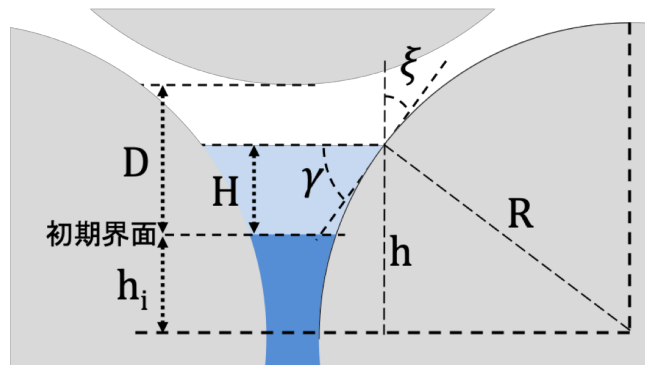


図 3.2 多孔質体粒子間に保持された水分の模式図. R : 壁面の曲率半径, h : 間隙径が最も細くなるくびれの高さを基準とした水位, h_i : 初期水位, H : 気液界面の移動距離, D : 初期界面から上部の粒子壁面までの距離.

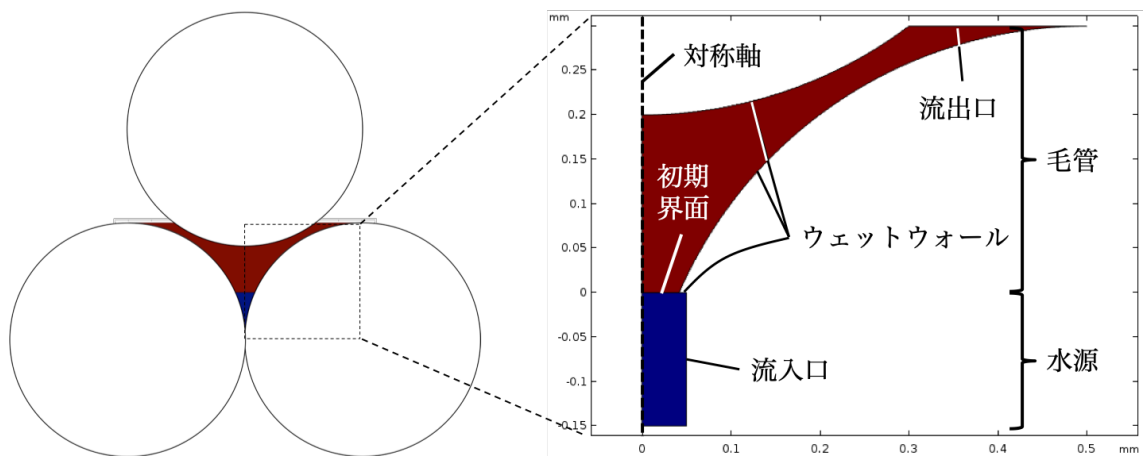


図 3.3 逆円錐形毛管の軸対象モデルと境界条件

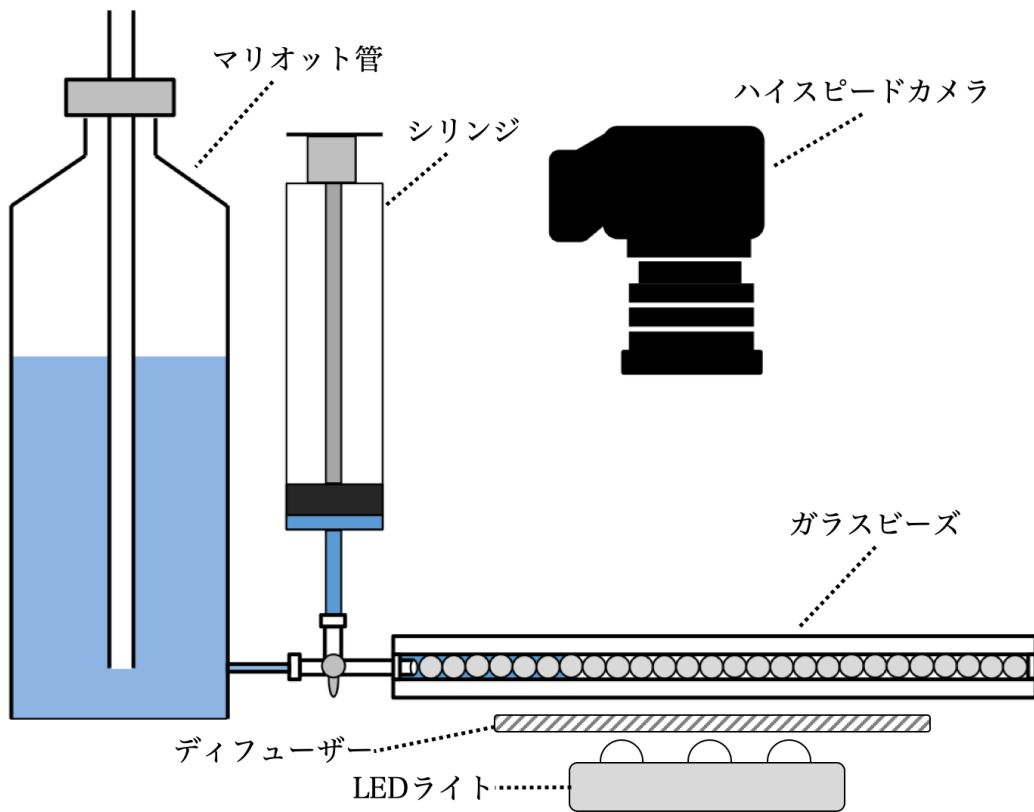
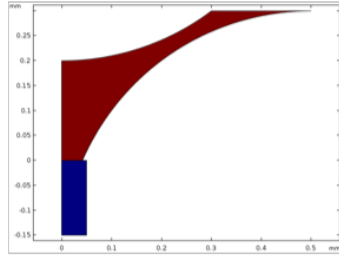


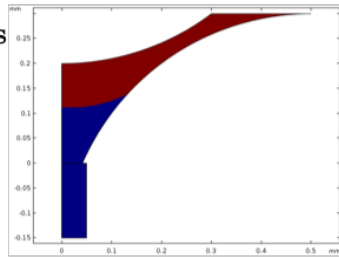
図 3.4 浸潤実験装置図. 単層多孔質体中の水分移動をハイスピードカメラによって撮影した.

親水処理

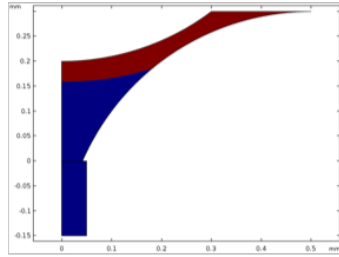
a) 0 s



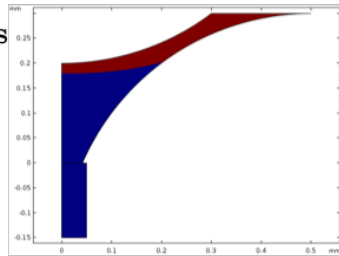
b) 0.00075 s



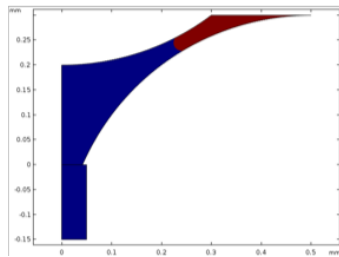
c) 0.0015 s



d) 0.00225 s

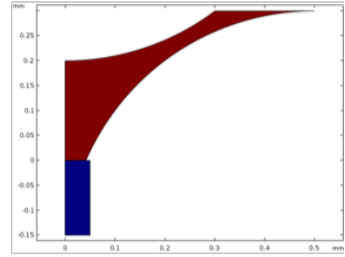


e) 0.003 s

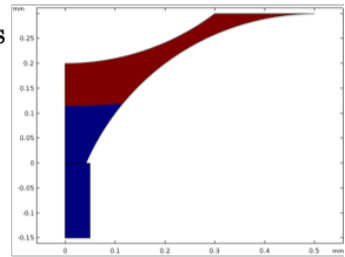


撥水処理

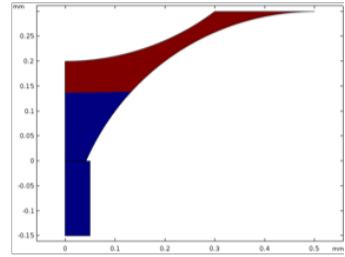
f) 0 s



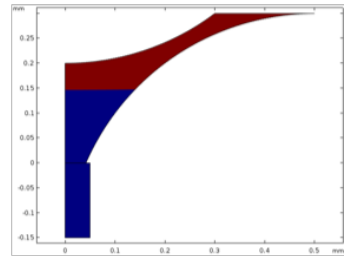
g) 0.00075 s



h) 0.0015 s



i) 0.00225 s



j) 0.003 s

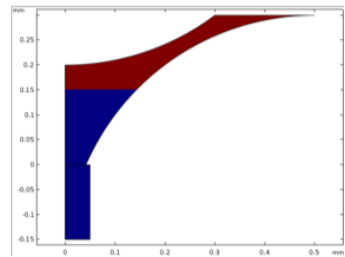


図 3.5 COMSOL による間隙中の水分移動シミュレーション結果. 赤：空気，青：浸潤溶液

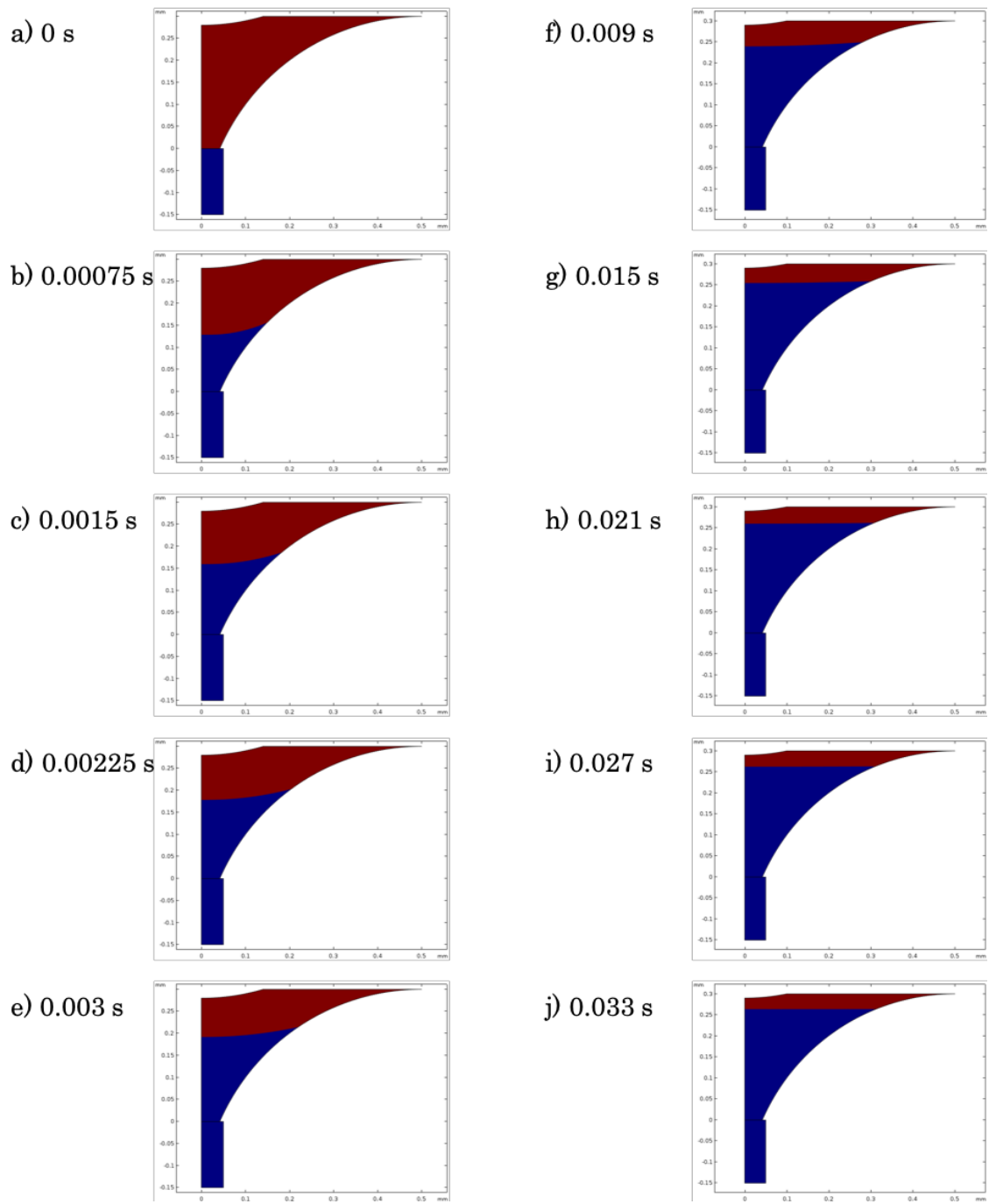
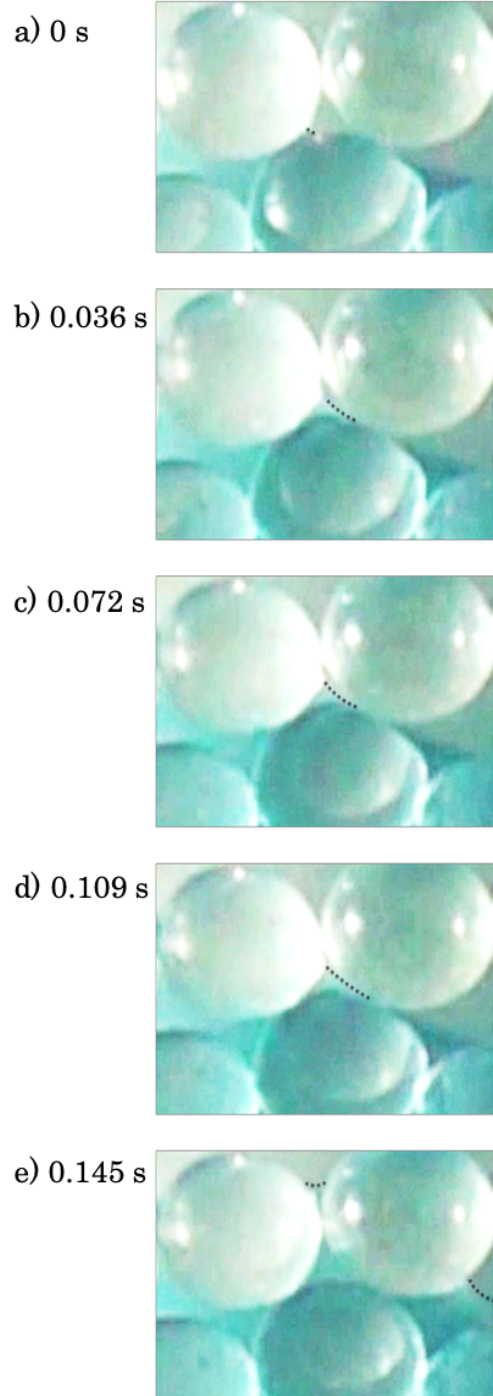


図 3.6 粒子間距離が大きい間隙における親水条件の毛管上昇. 赤：空気，青：浸潤溶液

hydrophilic



hydrophobic

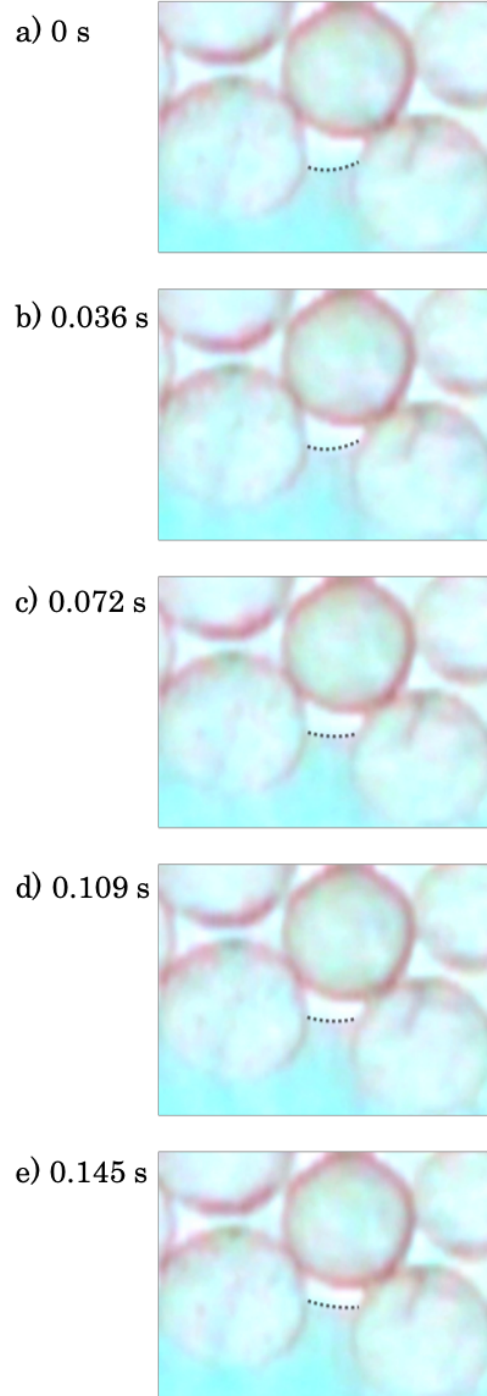


図 3.7 粒子間の水分移動. 浸潤溶液はメチレンブルーで着色した. 破線は気液界面の位置を示す.

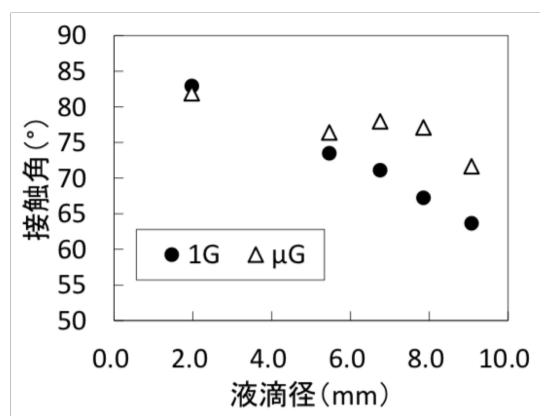


図 3.8 液滴径ごとの 1G および μ G 下における接触角(長沼ら, 2017).

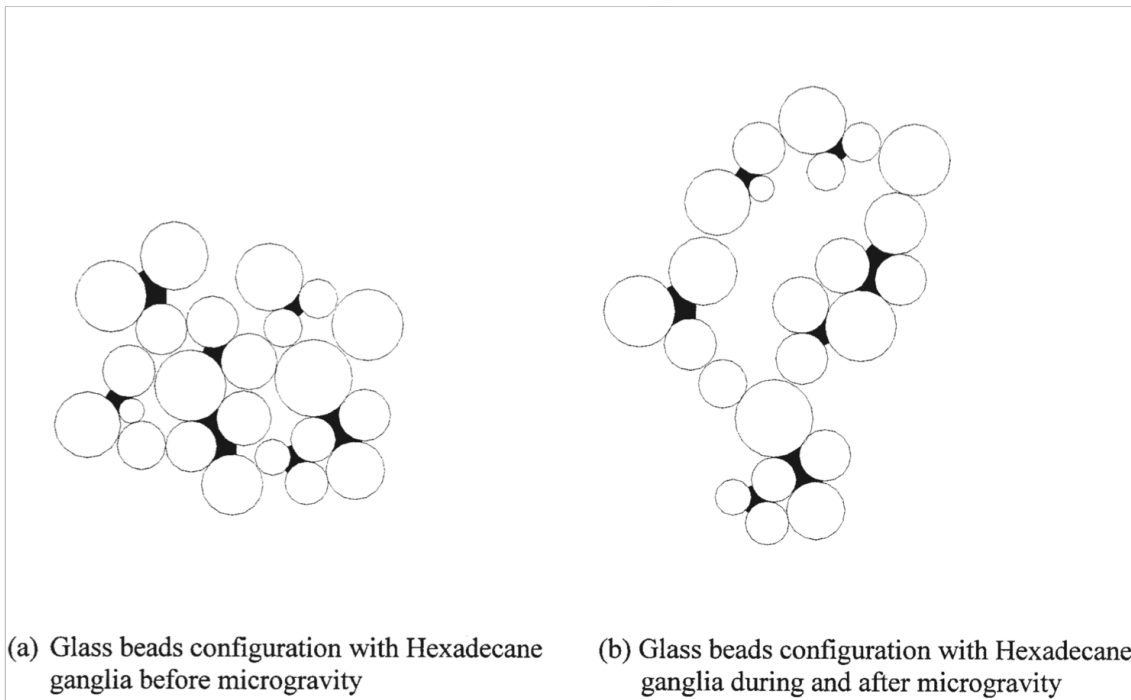


図 3.9 1G および μG 下における粒子配列の違い(Reddi et al., 2005). 1G 下(a)においては重力による下方向の力によって密な配列になるが, μG 下(b)では粒子同士の距離が大きくなる.

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

4.1 浸潤溶液の物理性と従来の相対的移動度指標

密度・粘性・表面張力といった浸潤溶液の物理性はマトリックポテンシャルや透水係数を支配するパラメータであるが、特に粘性について野川ら (2018) は重力と負の相関があると報告しており、 μG 下における浸潤溶液の物理性の変化が水分移動を変化させた可能性がある。しかし、多孔質体中の浸潤に対して、どの因子がいつ、どれくらいの大きさで働くのかは明らかではない (Beatty and Smith, 2014)。

多孔質体中における自由表面をもつ流体の移動に関する研究は農学、工学、医学分野にわたって多く行われてきた。Washburn (1921) は、多孔質体が毛細管の集合体として考え、ポアズイユ式の拡張を行った。水平に設置した多孔質体中の浸潤移動について (4.1) 式を提案し、毛細管力のみによる浸潤距離 l は時間 t の平方根に比例すると述べた。

$$l = \sqrt{\frac{\sigma r \cos \gamma}{2\eta} t} \quad (4.1)$$

ここで σ は表面張力、 r は代表間隙半径、 γ は接触角、 η は粘性である。この単純な式は毛細管力と粘性抵抗のみを考え他の影響を無視したことにより得ることができたものである。Levine et al. (1977) は、実際の多孔質体は複雑な 3 次元構造をもっていると述べ、微視的な水分挙動を明らかにするためにはこのような複雑な形状の間隙で気液界面がどのように移動するかを明らかにする必要があると報告した。Jeje (1978) は慣性項や摩擦の影響を考慮して、水平および垂直に設置した毛細管の中における界面移動速度を調べた。毛管力と運動エネルギーの比であるパラメータ「friction factor」を用い

本章は Soil Science に受理された論文*の一部を抜粋したものである。

*Naoto Sato, and K. Noborio. (2018): Dimensional Analysis of Horizontal Infiltration Affected by Surface Tension and Viscosity. Soil Science. 183(3): pp. 83-88.

て、レイノルズ数と friction factor の関係を得た。Jeje (1978) は浸潤初期においては friction factor が理論値よりも大きい、浸潤開始するとただちに理論値に落ちることを発見した。このことから浸潤初期において接触角の変化が起こると考えられた。Ichikawa and Satoda (1994) は界面張力の影響を調べるため、様々な材質 (Pyrex glass, 石英, テフロンチューブ) の細いチューブを水平に設置し、気液界面が自発的に移動する様子を観察した。浸透溶液として蒸留水とメチルアルコールを使用した。菅の内面が湿潤状態のときには、固液界面の影響が無くなるため、理論とよく一致することを確かめた。また壁面が乾燥していると濡れているときよりも進行速度が小さいと述べた。藤縄と高橋 (2004) は乾燥および湿潤状態の豊浦砂を用いてガソリン, 灯油, 軽油, エタノールおよび水の鉛直上方浸潤を観察した。初期乾燥条件では、軽油が水に次いで毛管上昇高さが高く、灯油とガソリンがほぼ同等となることを報告した。初期湿潤条件では軽油, 灯油, ガソリンでほぼ同等であった。また、鉛直上方浸潤について感度解析を行い、(1) 液体密度は初期における上昇速度にあまり影響を与えないこと、(2) 表面張力が大きいほど上昇速度が大きくなること、(3) 粘性係数が小さいほど早く平衡に達することを明らかにした。石黒ら (2005) はアニオン界面活性剤の濃度の違いが土壌への浸潤におよぼす影響を明らかにした。高濃度では表面張力の低下により上昇高が小さくなったが、低濃度の毛管上昇と水の毛管上昇には差がなかった。アニオン界面活性剤が土粒子表面に吸着したことで (Allred and Brown, 1996), 浸潤先端の溶液濃度が極めて小さくなったためだと考えられた。

浸潤溶液の物理性の相対的な影響力の大きさは、水と異なる物理性を持つ浸潤溶液の、水に対する相対的な移動しやすさ (相対的移動度: relative mobility) として評価される。多孔質体中の水の通りやすさを表す指標である透水係数 K は次のように表される (Constanz, 1982)。

$$K = k\rho g/\eta \quad (4.2)$$

ここで、 k は透過率、 ρ は液体の密度、 g は重力加速度、 η は液体の粘性である。ある浸潤溶液の透水係数 K_i に対する水の透水係数 K_w の比は、

$$\frac{K_i}{K_w} = \frac{k_i\rho_i g_i/\eta_i}{k_w\rho_w g_w/\eta_w} \quad (4.3)$$

と表される。ここで添字 i は浸潤溶液を示し、 w は水を示す。透過率は土壌に固有の値 ($k_i = k_w$) である。重力加速度が一定 (ただし $g \neq 0$) のとき、(4.3)式は次のように書き換えられる。

$$\frac{K_i}{K_w} = \frac{\rho_i/\rho_w}{\eta_i/\eta_w} \equiv fm \quad (4.4)$$

(4.4)式は fluid mobility factor (fm) と呼ばれ (Beatty and Smith, 2014), 多孔質体中の水分浸潤に対する密度と粘性の相対的な影響力を表す指標として用いられている。しかし, 可変重力下における相対的移動度を考えるとき, (4.2)式は適用できない可能性がある。 μG 下では $g = 0$ を代入することにより $K = 0$ が導かれる。しかし, 水分移動は μG 下においても明らかに起こっており (Yendler et al., 1996), K はゼロではない。(4.2)式は透水係数が重量 (ρg) と正の相関を持ち, 粘性 (η) と負の相関を持つことを示すが, $g \approx 0$ である μG 下では重量が消去され密度の大きさは無視される。一方でマトリックポテンシャルの主な要因である毛管力を支配する表面張力 (σ) の影響は無視できない。多孔質体中の水分は表面張力と重力の相互のバランスによって移動する (Chau et al., 2005) ので, μG 下においては表面張力の影響が大きく現れる。したがって Beatty and Smith (2014) によって提案された fm は可変重力下では適さないと考えられる。

4.2 次元解析による水平浸潤理論の推定と S-N number の提案

可変重力下においても適用可能な相対的移動度を表す指標を提案するため, 次元解析による水平浸潤理論の推定を行なった。次元解析とは異なる次元をもつ物理量の間にある関係を推定する方法である。ある浸潤溶液による水平浸潤を記述するため, 新しい無次元数 S-N number を提案する。多孔質体中の水平浸潤について, 経過時間 t および浸潤距離 l の次元はそれぞれ時間 [T] と長さ [L] である。浸潤距離 l [L] に関係しそのような物理量として経過時間 t [T], 代表間隙半径 r [L], 浸潤溶液の表面張力 σ [MT⁻²] および粘性 η [ML⁻¹T⁻¹] が挙げられ, 次のような式が仮定できる。

$$l = \beta(\sigma)^a(r)^b(\eta)^c(t)^d \quad (4.5)$$

ここで β は無次元定数である。 l , t , r , σ , η の次元から (4.5)式は次のような次元式で表される。

$$[L] = \beta[MT^{-2}]^a[L]^b[ML^{-1}T^{-1}]^c[T]^d \quad (4.6)$$

(4.5)式および (4.6)式の恒等式を満たす必要十分条件は, 両辺の基本次元の指数が等しいことであり, 条件を満たすように指数を整理することで, 2つの無次元パラメータ (l/r) および ($\sigma t/r\eta$) を含む (4.7)式が得られる。

$$\frac{l}{r} = \beta \left(\frac{\sigma t}{r \eta} \right)^a \quad (4.7)$$

右辺の $(\sigma t/r\eta)$ は粘性と表面張力の比によって表される無次元パラメータであり、水平浸潤における粘性と表面張力の相対的な重要性を定量している。ここで水の $(\sigma t/r\eta)$ に対するある浸潤溶液の $(\sigma t/r\eta)$ の比を S-N number と定義した。

$$S-N \text{ number} = \frac{\frac{\sigma_i \cdot t_i}{r_i \cdot \eta_i}}{\frac{\sigma_w \cdot t_w}{r_w \cdot \eta_w}} \quad (4.8)$$

ここで添字の i は浸潤溶液を示し、 w は水を示す。多孔質体の物理的構造が同じ、すなわち代表間隙径が同じであるとき、ある時間 t における S-N number は次のように単純化できる。

$$S-N \text{ number} = \frac{\frac{\sigma_i}{\sigma_w}}{\frac{\eta_i}{\eta_w}} \quad (4.9)$$

S-N number は水平浸潤において水に対するある浸潤溶液の相対的移動度を示す指標として用いることができる。

4.3 実験方法

S-N number の適用性を評価するため表面張力と粘性が異なる様々な濃度のエタノール水溶液 (AES) を用いて水平浸潤実験を行なった。多孔質体試料として豊浦砂を用いた。用いた試料特性を表 4.1 に示す。間隙比 e は (4.10)式 (Arya et al., 1999) によって算出した。

$$e = \frac{(\rho_s - \rho_b)}{\rho_b} \quad (4.10)$$

ここで、 ρ_s は土粒子密度 (g/cm^3)、 ρ_b は乾燥密度 (g/cm^3)である。代表間隙径 r (cm)は (4.11)式 (Arya et al., 1999) によって算出した。

$$r = 0.816 D_{50} \sqrt{e} \quad (4.11)$$

ここで D_{50} は代表粒径 (cm) である。

浸潤溶液として AES (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 vol%) を用いた。各濃度の AES の密度、粘性、表面張力を表 4.2 に示す。マトリックポテンシャルの大きさを決定する要因である表面張力は AES 濃度の増加にともなって減少する。一方で粘性は 40 vol%までは増加し、より高い濃度になるにつれて低下する。粘性とは隣接する

分子の速度差を減らすように働く摩擦力で、粘性の増加は浸潤を抑制する。接触角の変化は浸潤速度に影響を与える (Friedman, 1999)。様々な濃度の AES はそれぞれ異なる接触角である可能性がある (Beatty and Smith, 2014) が、本実験で用いた豊浦砂は親水性であり、全ての濃度の AES について接触角は十分に小さいものとした。

実験装置の模式図を図 4.1 に示す。浸潤を可視化するためカラムは無色透明の亚克力製で、内径 2.4 cm、長さ 40 cm の円筒型を用いた。カラムは 1 cm ごとに分解できるようになっており、実験後の水分分布測定を可能にした。多孔質体試料へ均一に浸潤させるため、プラスチックメッシュ (目開き 1.5 ± 0.5 mm) をガーゼで覆った多孔質板をカラムの流入口に設置した。カラムの反対側は大気に開放した。豊浦砂を均一に充填したカラムを水平に設置しマリOTT管を接続した。マリOTT管のチューブ下端の高さを多孔質体カラムの中心と揃えることで流入口にかかる水頭圧を無視した。マリOTT管とカラムの間の空気を抜くためシリンジを接続した。

実験はシリンジによりマリOTT管と多孔質体カラムの間の空気を抜くことによって開始された。空気を抜くと浸潤溶液が多孔質体に接触し、浸潤が開始した。経過時間と浸潤距離を 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 15, 20 分後とそれ以降は 5 分ごとに測定した。浸潤距離が 30 cm に到達したことを確認後、ただちにカラムを分解し、各セクション (長さ 1 cm) ごとの体積含液率を測定した。実験はそれぞれの濃度に対して 3 反復ずつ行なった。

4.4 結果と考察

Washburn (1921) によって提案された (4.1)式によれば、浸潤距離 l は時間の平方根 $t^{0.5}$ に比例する。全ての濃度の AES で l が $t^{0.5}$ に比例した (図 4.2)。図 4.2 の各濃度の実測値に対する近似直線の傾き ε は浸潤速度を表す。0 vol% から 30 vol% では濃度の増加とともに ε は低下したが、70 vol% から 100 vol% では濃度の増加とともに ε は増加した。 ε と fm および S-N number の関係を図 4.3 に示す。相関係数はそれぞれ fm で 0.93, S-N number で 0.95 であった。1G 下において S-N number は fm と同様に浸潤速度の変化をよく表した。密度は透水係数の中で重量の項として含まれており ((4.2)式), 重力加速度が極めて小さい μ G 下では密度の働きは無視される。したがって μ G 下において透水係数に基づいた fm は相対的移動度を表す指標として適当でない。一方で S-N number は表面張力や粘性の変化による相対的移動度を表す指標としてあらゆる重力

下において普遍的に適用可能であると考えられる。

浸潤距離が 30 cm に到達した時点の水分分布曲線を図 4.4 に示す。浸潤前線付近では大きなマトリックポテンシャル勾配を打ち消すほど透水係数が小さいため（取出ら, 2010），矩形の水分分布曲線が現れる。低い濃度の AES の体積含液率は 30 cm の浸潤前線付近で急激に減少し浸潤前線がはっきりと現れた。ところが，高い濃度の AES ではカラム上方の浸潤速度に比べてカラム下方の浸潤速度が大きかったため，距離の増加とともに体積含液率が低下し，浸潤前線がはっきりと分からなくなった。多孔質体中の水分分布は毛管力と重力が相互に作用し決定される（Chau et al., 2005）。ボンドナンバー（ B_o ）は毛管力に対する重力の相対的な影響力の大きさを定量する指標であり（Or et al., 2009），(4.12)式によって定義される（Stange et al., 2003）。

$$B_o = \frac{\rho g r^2}{\sigma} \quad (4.12)$$

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ および $r = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ を用いて計算すると，0%の AES では $B_o = 3.0 \cdot 10^{-3}$ ，100%の AES では $B_o = 7.8 \cdot 10^{-3}$ であった。表面張力の減少に伴う毛管力の減少により重力の影響が強調され，巨視的な水分分布が変化したと考えられる。

4.5 結論

新しく定義された S-N number は粘性と表面張力の変化による水平浸潤速度の変化をよく表した。宇宙農業では，低重力下における浸潤速度を正確に予測することが不可欠である。重力による粘性や表面張力の変化が明らかになれば，S-N number を用いて地球と異なる重力条件での浸潤速度を推定することが可能である。浸潤溶液の粘性や表面張力などの物理性は水分分布にも影響するため，様々な重力下におけるそれらの物理性の変化や浸潤速度を明らかにするためには，さらなる低重力下実験が不可欠である。

引用文献

- 石黒 宗秀, 藤井 知和, 赤江 剛夫. 2005. 土・多孔質体中の毛管上昇浸潤に及ぼすアニオン界面活性剤溶液濃度の影響. 農業土木学会論文集, 2005(236): pp. 131-137.
- 取出 伸夫, 渡辺 晋生, 久行 雄大, 坂井 勝. 2010. 土中への水の浸潤 3. Green and Ampt モデル. 土壌の物理性. 土壌物理学会, 115: pp. 51-60.
- 野川 健人, 佐藤 直人, 長沼 菜摘, 丸尾 裕一, 登尾 浩助. 2018. 重力の変化と粘性の関係. 2018 年度土壌物理学会大会講演要旨集, pp. 94-95.
- 藤縄克之, 高橋真. 2004. 通気帯における石油系炭化水素の毛管移動現象に関する基礎的研究. 土木学会論文集, (762): pp. 69-81.
- Allred B. and G.O. Brown. 1996. Anionic surfactant transport characteristics in unsaturated soil. *Soil Sci.* 161(7): pp. 415-425.
- Arya L.M., F.J. Leiji, M.T. van Genuchten, and P.J. Shouse. 1999. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(3): pp. 510-519.
- Beatty S.M. and J.E. Smith. 2014. Infiltration of water and ethanol solutions in water repellent post wildfire soils. *J. Hydrol.* 514: pp. 233-248.
- Chau J.F., D. Or, and M.C. Sukop. 2005. Simulation of gaseous diffusion in partially saturated porous media under variable gravity with lattice Boltzmann methods. *Water Resour. Res.* 41(8).
- Constantz J. 1982. Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46(3): pp. 466-470.
- Friedman S.P. 1999. Dynamic contact angle explanation of flow rate-dependent saturation-pressure relationships during transient liquid flow in unsaturated porous media. *J. Adhesion Sci. Technol.* 13(12): pp. 1495-1518.
- Ichikawa N., and Y. Satoda. 1994. Interface dynamics of capillary flow in a tube under negligible gravity condition. *J. Coll. Inter. Sci.* 162(2): pp. 350-355.
- Jeje A.A., 1979. Rates of spontaneous movement of water in capillary tubes. *J. Coll. Inter. Sci.* 69(3): pp. 420-429.
- Levine S., P. Reed, G. Shutts, and G. Neale. 1977. Some aspects of wetting/dewetting of a porous medium. *Powder Technol.* 17(2): pp. 163-181.
- Or D., M. Tuller, and S.B. Jones. 2009. Liquid behavior in partially saturated porous

- media under variable gravity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(2): pp. 341-350.
- Stange M., M.E. Dreyer, and H.J. Rath. 2003. Capillary driven flow in circular cylindrical tubes. *Phys. Fluids.* 15(9): pp. 2587-2601.
- Vazquez G., E. Alvarez, and J.M. Navaza. 1995. Surface tension of alcohol + water from 20 to 50 °C. *J. Chem. Eng. Data.* 40(3): pp. 611-614.
- Washburn, E. W. 1921. The dynamics of capillary flow. *Physical Review.* 17(3): pp. 273-283.
- Yendler, B. S., B. Webbon, I. Podolski, and R. J. Bula. 1996. Capillary movement of liquid in granular beds in microgravity. *Advances in Space Research.* 18(4/5): pp. 233-237.

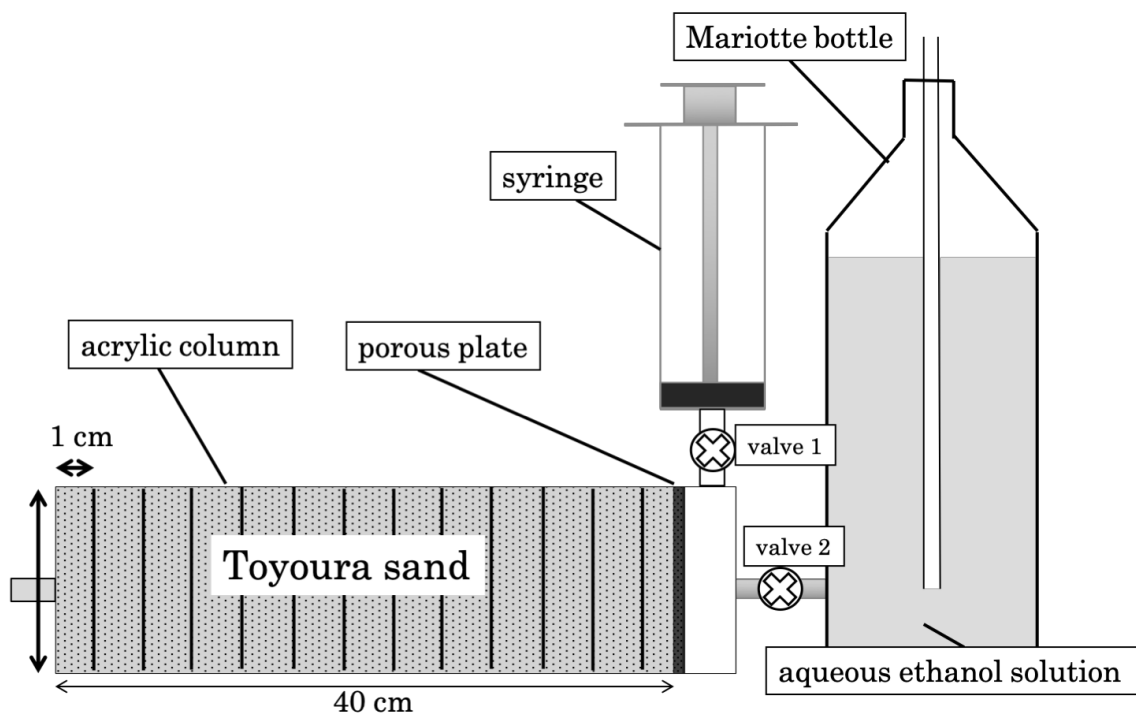


図 4.1 エタノール浸潤実験装置.

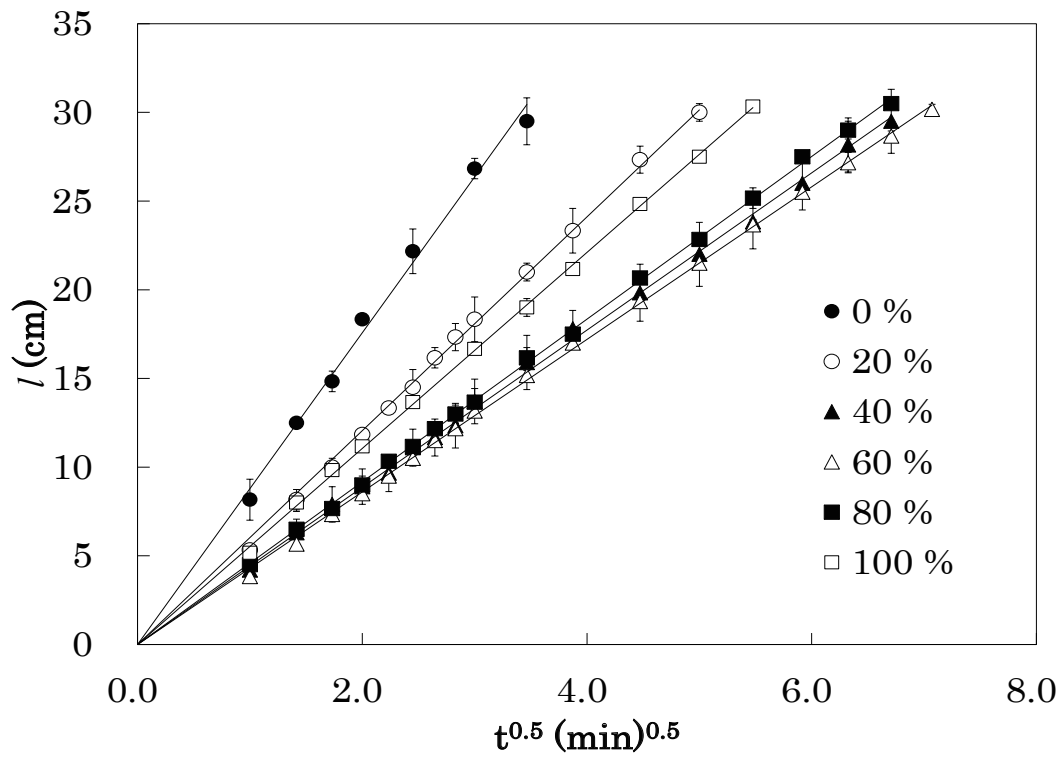


図 4.2 各濃度のエタノール浸潤実験における浸潤距離 L と経過時間の平方根 $t^{0.5}$ の関係.

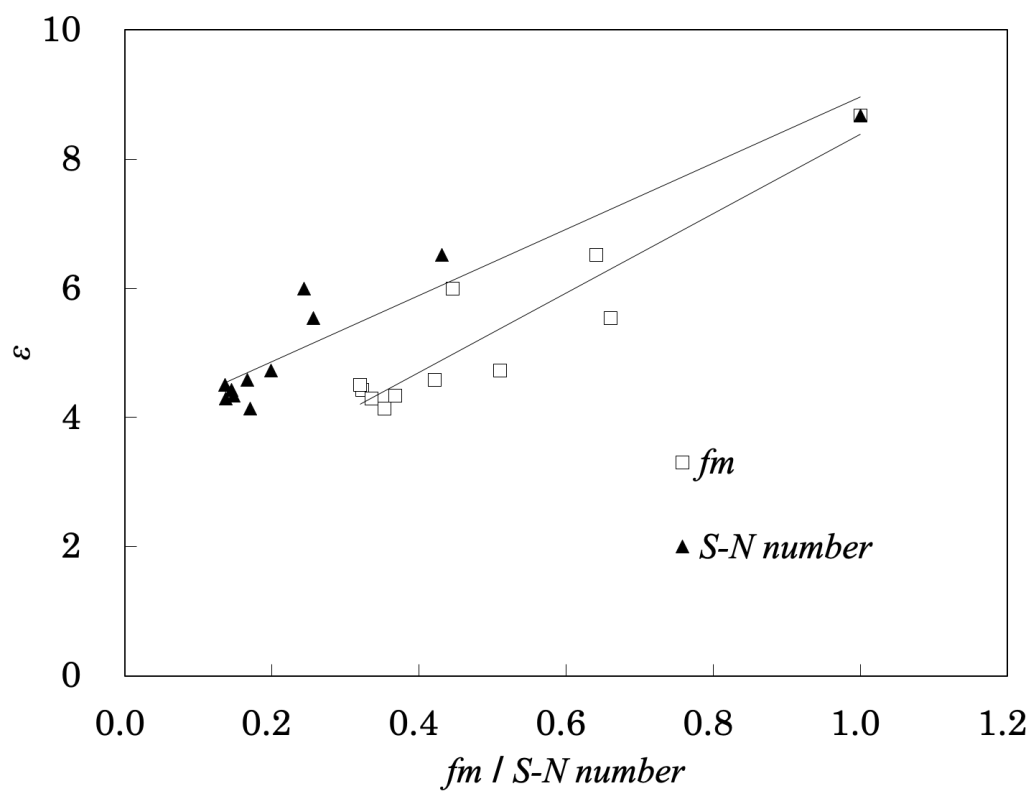


図 4.3 浸潤速度 ϵ と fm および $S-N \text{ number}$ の関係.

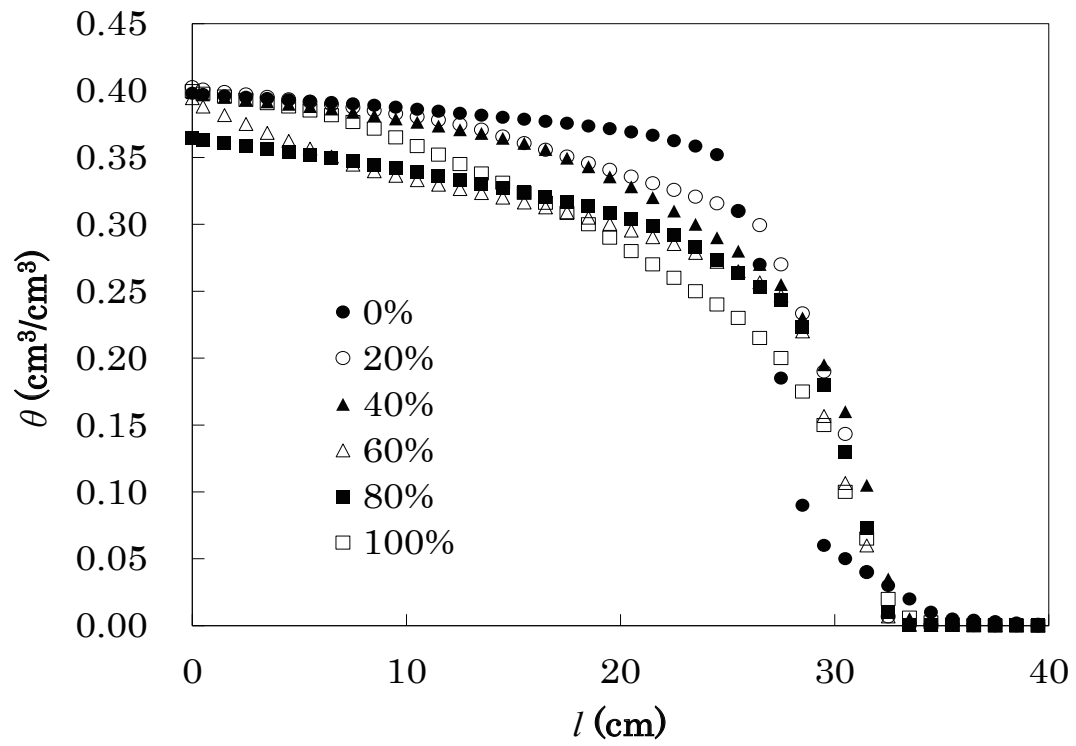


図 4.4 各濃度のエタノール浸潤実験において浸潤前線が 30 cm に到達した時点の水分分布曲線.

表 4.1 実験に供試した豊浦砂の特性.

Property	Symbol	Average \pm SD
Particle density (N=6)	ρ_s	$2.64 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$
Bulk density (N=32)	ρ_b	$1.57 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$
Particle distribution (N=4)	> 0.850 mm	$0.0 \pm 0.0 \%$
	0.250–0.850 mm	$24.1 \pm 5.1 \%$
	0.075 –0.250 mm	$75.5 \pm 5.0 \%$
	< 0.075 mm	$0.4 \pm 0.2 \%$
Mass-median-diameter (N=4)	D_{50}	$0.22 \pm 0.01 \text{ mm}$
Void ratio	e	0.69
Mean pore size	r	0.15 mm

表 4.2 20°C の各濃度エタノール水溶液(AES)の物性値 (Vazquez et al., 1995). 値は 5–10 回の測定値の平均値であり, 最大偏差は 0.4%未満であった.

Concentration %	Surface tension mN/m	Density Mg/m ³	Viscosity mPa s
0	72.8	0.998	1.002
10	48.1	0.982	1.538
20	38.6	0.969	2.183
30	33.5	0.954	2.710
40	30.7	0.935	2.910
50	28.5	0.914	2.870
60	26.7	0.891	2.670
70	25.5	0.868	2.370
80	24.3	0.843	2.008
90	23.2	0.818	1.610
100	22.3	0.789	1.200

第5章 擬似微小重力実験の適用性の評価

5.1 3Dクリノスタットによる微小重力実験の必要性

現在、地球上で μG 実験を行う手段としては、観測ロケット、観測気球を用いた自由落下、パラボリックフライト、落下塔などが挙げられる。しかし、これらの方法は μG 継続時間が2秒から8分程度であり、多孔質体中の水分移動を観察するには短いため、ゆっくりとした現象を取り扱う土壌物理実験を行うのは困難である。また宇宙ステーションも含めたこれらの μG 実験が高コストであることも、土壌物理実験を μG 下で行うことが困難であることの原因である。

一方で植物実験や微生物実験において μG 環境を模擬する方法として、3Dクリノスタットの利用が行われている（例えば、Nakamura et al., 1999; Brown et al., 2002）。3Dクリノスタットとは、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 μG を模擬する手段として考案された（Hoson et al., 1997）。ただし、3Dクリノスタットにより μG 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（Hoson et al., 1997）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。3Dクリノスタットは古くから植物実験に対しては適用が可能であるとされ（Yamada et al., 1993）、使用されてきた。また、近年では、物理科学実験に対しても援用の試みが行われており（Yamashita et al., 2016）、より多くの分野の実験に対しての適用が期待されている。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である（Nakamura et al., 1999）。もし土壌物理実験に対してもクリノスタットを適用することができれば、低コストで長時間の μG 実験を行うことが可能となる。そこで、本研究では、 μG 下における多孔質体中の水分移動の模擬を目的として、クリノスタットの適用性の評価を行った。

本章は明治大学農学部研究報告に受理された論文*の一部を抜粋したものである。

*佐藤 直人, 丸尾 裕一, 登尾 浩助. (2019): 多孔質体中の水分浸潤に対するクリノスタットが作る微小重力条件の評価. 明治大学農学部研究報告, 68(2). (印刷中)

5.2 実験方法

5.2.1 クリノスタットによる擬似微小重力の作出

本研究では、3D クリノスタットを用いて擬似 μG を作出した。クリノスタットとは、直交する 2 軸が独立して回転することにより試料に作用する重力のベクトルを 3 次元的に均等に分散する (Hoson et al., 1997) ことで、試料に作用する重力ベクトルの総和をほぼゼロにする装置である。装置内における直交する 3 軸の重力加速度は加速度センサー (MM-2860, サンハヤト社および BMA250, Bosch 社) を用いて測定した。測定した値はデータロガー (MIJ-01, 日本環境計測株式会社) により記録した。各軸における時間平均加速度 $\bar{g}(t)$ を (5.1) 式により算出した。

$$\bar{g}(t) = \frac{\Delta t}{t} \sum_{i=0}^{t/\Delta t} a_i \quad (5.1)$$

ここで、 t は測定開始からの経過時間 (s)、 a_i は $t=i$ における重力加速度の瞬時値 (m/s^2) である。まず、装置の中央にセンサーを設置し、クリノスタットを 5,000 秒間回転させて加速度を測定した。各軸の時間平均加速度の結果を図 5.1 に示す。また、0G 付近を拡大したものを図 5.2 に示す。X 軸、Y 軸、Z 軸は全て、100 秒程度で 10^{-1}G 以下に収束し (図 5.1)、その後 10^{-3}G のオーダーに収束した (図 5.2)。

5.2.2 実験試料と実験装置

クリノスタットにより μG 下における水分移動を模擬することができるか確認するため、3D クリノスタット上で水分浸潤実験を行ない、浸潤速度を比較した。実験に供試した多孔質体試料は、豊浦砂、粒径 0.05 mm のガラスビーズ、関東ロームである。それぞれの多孔質体は表 5.1 に示した乾燥密度となるようにカラムに充填した。試料を充填するカラムは内径 24 mm 長さ 70 mm の透明アクリルパイプを用いて作成した (図 5.3)。アクリルパイプの両端をゴム栓で閉じた。この際、ゴム栓はカラム内部に 10 mm 差し込んだ。ゴム栓の中央には穴 (直径 5 mm) を開け、カラムの両端において外部と気体や液体のやりとりを可能とした。多孔質体を充填する際は、多孔質体がゴム栓の穴から流出するのを防止するため、多孔質体とゴム栓の間にメッシュを挿入した。多孔質体が充填される空間 (長さ 50 mm) には水分センサーを浸潤方向と垂直に 5 mm

間隔で9組挿入した。水分センサーのからの出力はデータロガー (MIJ-01, 日本環境計測株式会社) によって記録し, 水分移動速度を計算した。給水はカラムの一端から行なった。ゴム栓の一方からチューブをのぼし3方電磁弁を通してシリンジポンプと水源に接続した。シリンジポンプは実験の開始時に水分を多孔質体に接触させる目的で用いるもので, 給水量は3 mlに固定した。シリンジポンプによる給水完了後, 3方電磁弁の切り替えにより, カラムと水源を接続し, 多孔質体が水源から吸水できるようにした。浸潤実験では水源に圧力が少しでもかかると水分移動に影響する (Yendler et al., 1996) ので, 多孔質体が吸水する際に水源に負圧がかからないように水源はやわらかいビニール袋 (厚さ 0.006 mm, ポリエチレン製) を用いて作成した。浸潤溶液には蒸留水を用いた。実験装置をクリノスタットに載せた様子を図 5.4 に示した。

5.2.3 擬似微小重力実験

クリノスタット回転開始直後の慣性力の影響を排除するため, 実験開始前にあらかじめ20分以上クリノスタットを回転させたのち浸潤実験を開始した。ストップウォッチを用いて計測した回転速度は, 水平軸に対して2 rpm, 水平軸と直行する軸に対して1 rpmであった。実験開始時にシリンジポンプを起動し, 蒸留水を3 ml注入した。シリンジポンプによる注水完了直後に3方電磁弁を切り替え, 多孔質体カラムと水源を接続した。このように少量の水を注入し多孔質体の一番手前の数層に水を触れさせた後, 多孔質体と水源の間の水を連続させることにより, 多孔質体の吸水力による水分移動が開始した。加速度センサーおよび水分センサーは測定間隔を800 msとして実験開始から実験終了まで計測を行なった。5 mm地点のセンサーが反応した時間を $t=0$ として, 浸潤時間 t と浸潤距離 L の関係を記録した。実験装置の大きさは回転中心から半径100 mm以内に収まっており, 2 rpmで回転させた際の遠心加速度は最大で $4.5 \cdot 10^{-4}G$ と算出されることから, 浸潤に対する遠心加速度の影響はほとんど無視できると判断した。

5.2.4 水平浸潤実験

Jones and Or (1999) は宇宙ステーション Mir で行われた浸潤実験の結果から, μG 下における浸潤速度は1G下における水平浸潤よりも遅く, 鉛直上方浸潤よりも速いと述べている。そこで, ガラスビーズ (粒径 0.05 mm) を用いて1G下における水平浸潤

実験を実施し、クリノスタットによる擬似 μG 下における浸潤と比較した。擬似 μG 実験で使用したものと同一カラムとシリンジポンプを用いたが、水源には水頭圧を排除するためにマリオット水源を使用した。カラムは水平に設置し、マリオット水源の水頭高さをカラム中心の高さに合わせた。実験開始時にシリンジポンプを起動し、蒸留水を 3 ml 注入した。シリンジポンプによる注水完了直後に 3 方電磁弁を切り替え、多孔質体とマリオット水源を接続した。擬似 μG 実験と同様に 5 mm 地点のセンサーが反応した時間を $t=0$ として、浸潤時間 t と浸潤距離 L の関係を記録した。

5.3 結果

5.3.1 擬似微小重力実験

図 5.5 はクリノスタットを用いた浸潤実験における浸潤距離 L と経過時間の平方根 $t^{1/2}$ との関係である。経過時間は 5 mm 地点のセンサーに浸潤前線が到達した時間をゼロとした。Jones and Or (1999) によれば、重力勾配が無視できる条件下でマトリックポテンシャル勾配による圧力のみによる多孔質体中の浸潤について、浸潤距離 L と経過時間の平方根 $t^{1/2}$ の間には (5.2) 式のような関係がある。

$$L = S_p \cdot t^{1/2} \quad (5.2)$$

ここで S_p は浸潤溶液の特性（表面張力や粘性）や多孔質体の透水性などによって決定される係数である。ガラスビーズと関東ロームの結果（図 5.5b, c）では、浸潤距離 L が経過時間の平方根 $t^{1/2}$ に対して正比例関係を示し、(5.2) 式の関係を確認できた。一方で豊浦砂では直線関係を示さず、(5.2) 式の関係を確認できなかった。このことから、豊浦砂を用いた浸潤実験ではクリノスタットによって十分に重力を相殺できなかったと考えられる。図 5.6 は、豊浦砂を用いた浸潤実験における浸潤距離 L および時間平均加速度と経過時間 t の関係である。浸潤前線が 5 mm から 40 mm まで移動するのに経過した時間は 43 秒であった。豊浦砂における浸潤実験では浸潤完了までの期間に時間平均加速度が十分に小さくなっていなかった。また、速度の速い流れと遅い流れが交互に現れたことから、クリノスタットの回転により重力がかかる方向が変化していく影響を受けたと考えられる。10 mm から 15 mm までの浸潤が 10 秒かかったのに対して、15 mm から 20 mm までの浸潤にかかった時間は 5 秒であった。この間では Y 軸方向加速度が負から正に反転しており、このとき、水源が多孔質体カラムより低い位置から高い

位置に移動した。この水頭圧の変化が速度の変化に現れたと考えられる。一方で、関東ロームを用いた浸潤実験における浸潤距離 L および時間平均加速度と経過時間 t の関係を図 5.7 に示す。浸潤前線が 5 mm から 40 mm まで移動するのに経過した時間は 465 秒であった。時間平均加速度はこの期間に十分に小さい値 ($< 10^{-1}G$) に収束し、重力浸透の影響が確認できなくなった。時間平均加速度が $\pm 10^{-1}G$ の範囲に収束するのに必要な時間は 100 秒程度であり (図 5.1), 浸潤前線が 5 mm から 40 mm まで移動する時間が 114 秒であったガラスビーズにおいても関東ロームと同様に重力浸透の影響が見えなくなったことから、時間平均加速度が $\pm 10^{-1}G$ の範囲に収束すると重力浸透の影響が確認できなくなると考えられる。

また、各試料の飽和透水係数 K_s を参照 (表 5.1) すると、豊浦砂では 10^{-2} オーダーであるのに対して、ガラスビーズと関東ロームでは 10^{-3} オーダーと豊浦砂よりも小さい。本実験では、透水係数が小さく単位長さを浸潤するのに必要な時間が長くなると重力浸透の影響が見えなくなり、(5.2)式の関係を確認できるようになった。従って透水性の小さい多孔質体を用いた場合には、クリノスタットによって重力勾配が無い環境下を模擬できたと考えられる。

5.3.2 クリノスタット実験と水平浸潤実験の比較

粒径 0.05 mm のガラスビーズを用いて水平浸潤実験を行い、クリノスタットによる擬似 μG 実験と比較した結果を図 5.8 に示す。水平浸潤実験においても浸潤距離 L は経過時間の平方根 $t^{1/2}$ に対して正比例の関係を示し、(5.2)式の関係を確認できた。図 5.8 で見ると水平浸潤実験とクリノスタット実験の結果はほぼ一致した。即ち、クリノスタットでは Jones and Or (1999) が報告したような μG 条件を再現できないことが分かった。

5.4 まとめ

本実験ではクリノスタットによる模擬 μG の適用性を検討した結果、透水性が小さく、速度の遅い流れ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、 μG 下における浸潤を模擬できたとは考えられなかった。

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 μG 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、 μG 下では、浸潤溶液の特性、(例えば, Brutin et al., 2009) が報告した接触角が変化する可能性があるが、 1G 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 μG 下における真の浸潤を模擬するためには、 μG 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。

引用文献

- Brown RB, Klaus D and Todd P. (2002): Effects of space flight, clinorotation, and centrifugation on the substrate utilization efficiency of *E. coli*. *Microgravity Science and Technology*, 13: 24-29. 2002.
- Brutin D, Zhu Z, Rahli O, Xie J, Liu Q and Tadrict L. (2009): Sessile drop in microgravity: creation, contact angle and interface. *Microgravity Science and Technology*, 21: 67-76. 2009.
- Hoson T, Kamisaka S, Masuda Y, Yamashita M and Buchen B. (1997): Evaluation of the three-dimensional clinostat as a simulator of weightlessness. *Planta*, 203: S187-S197. 1997.
- Jones SB and Or D. (1999): Microgravity effects on water flow and distribution in unsaturated porous media: Analyses of flight experiments. *Water Resources Research*, 35: 929-942. 1999.
- Nakamura T, Sassa N, Kuroiwa E, Negishi Y, Hashimoto A, Yamashita M and Yamada M. (1999): Growth of *Prunus* tree stems under simulated microgravity conditions. *Advances in Space Research*, 23: 2017-2020. 1999.
- Yamada M, Takeuchi Y, Kasahara H, Murakami S and Yamashita M. (1993): Plant growth under clinostat-microgravity condition. *Biological Sciences in Space*, 7: 116-119. 1993.
- Yamashita Y, Yamazaki T, Endo T, Sakai K, Sakai H, Abe M, Natsuisaka M and Sakamoto. (2016): Effect of gravity on emulsion stability ~Report on admission in FASES project and our activity~. *Space Utilization Research*, 30. 2016.
- Yendler BS, Webbon B, Podolski I and Bula R J. (1996): Capillary movement of liquid in granular beds in microgravity. *Advances in Space Research*. 18: 233-237. 1996.

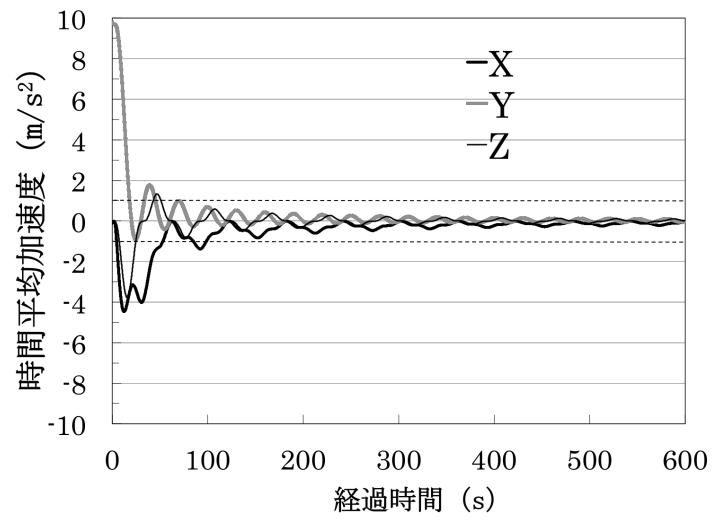


図 5.1 各軸の時間平均加速度の変化. いずれの軸においても時間平均加速度は 100 秒程度で $\pm 0.1G$ (点線)の範囲に収束した.

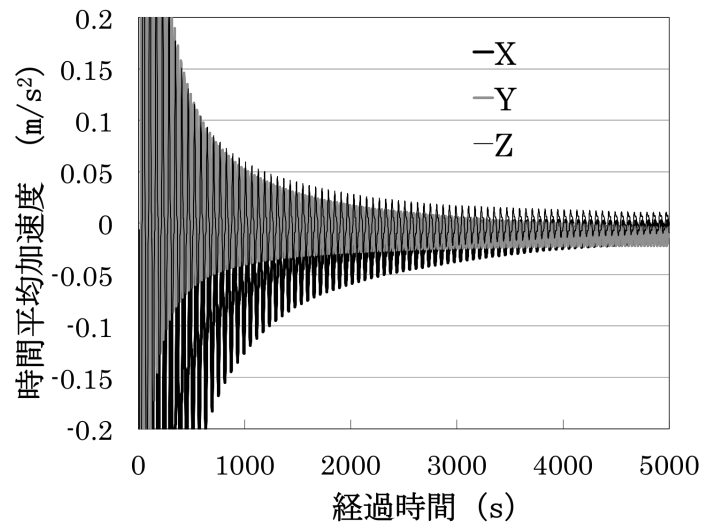


図 5.2 各軸における時間平均加速度の変化(0G 付近の拡大図). 各軸の時間平均加速度は 1300 秒程度で $\pm 10^{-3}G$ の範囲に収束した.

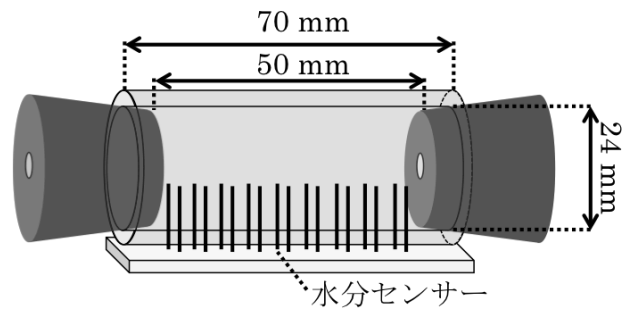


図 5.3 実験カラム概略図.

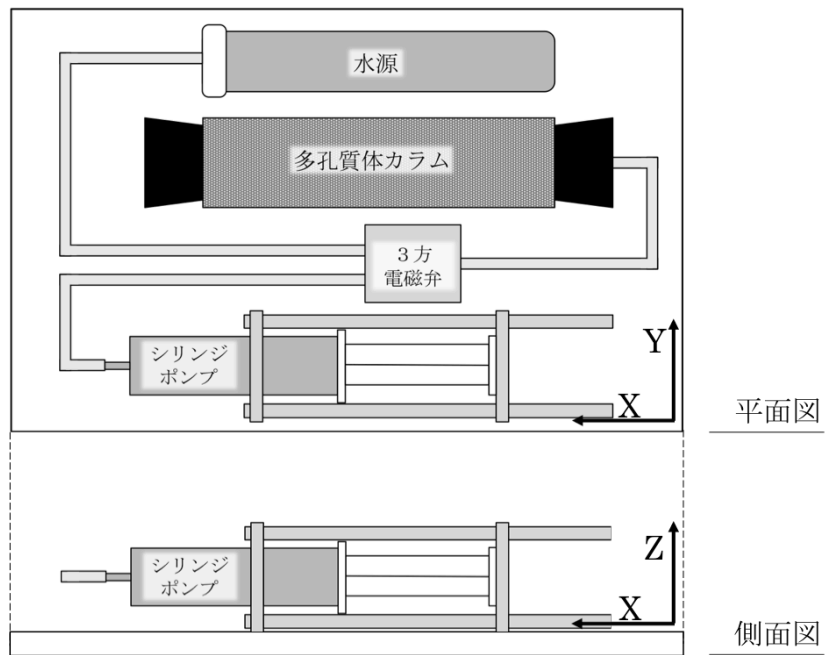


図 5.4 実験装置概略図.

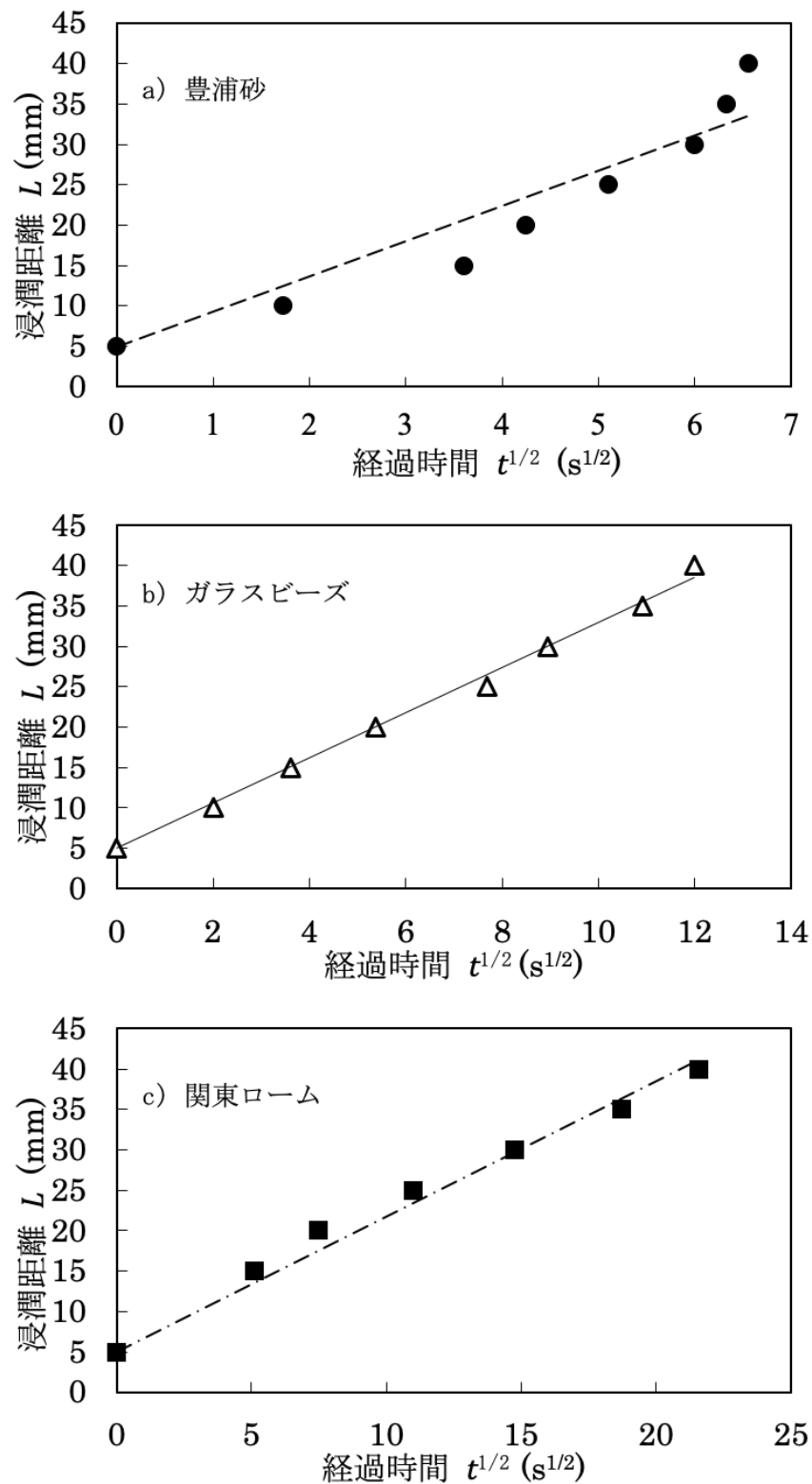


図 5.5 クリノスタットによる水分浸潤実験における浸潤距離と経過時間の平方根の関係.

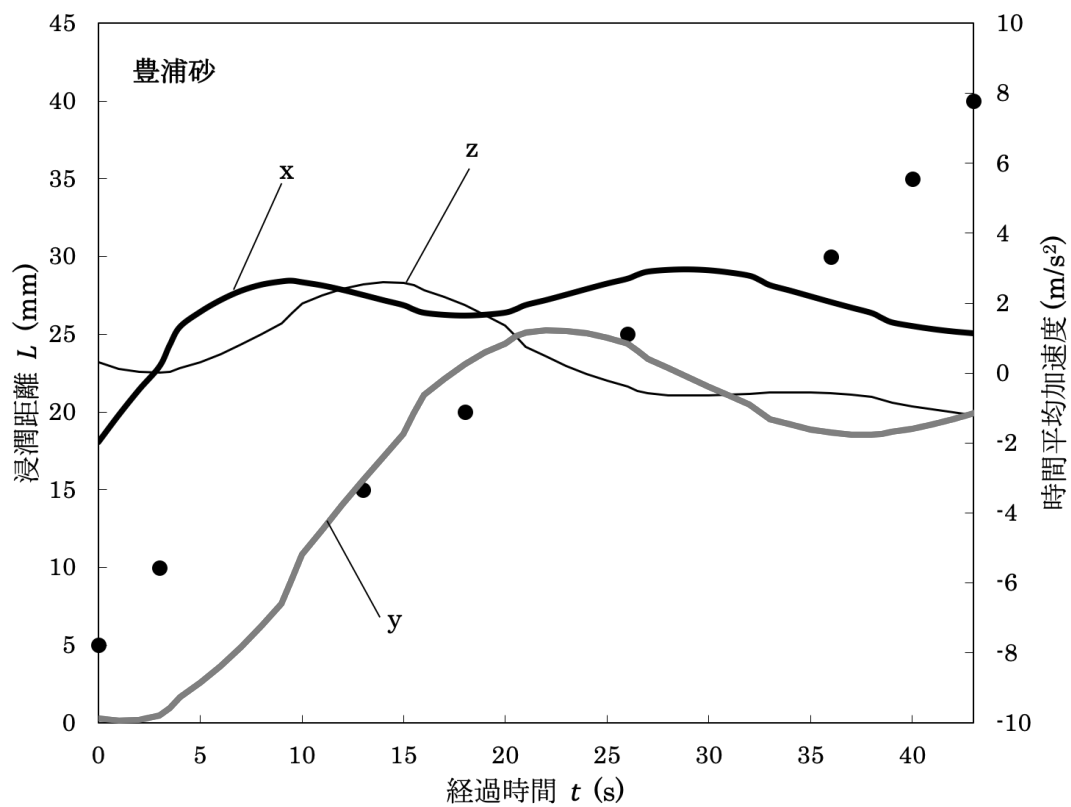


図 5.6 豊浦砂を用いた浸潤実験における時間の経過に対する浸潤距離(黒点)と各軸の時間平均加速度.

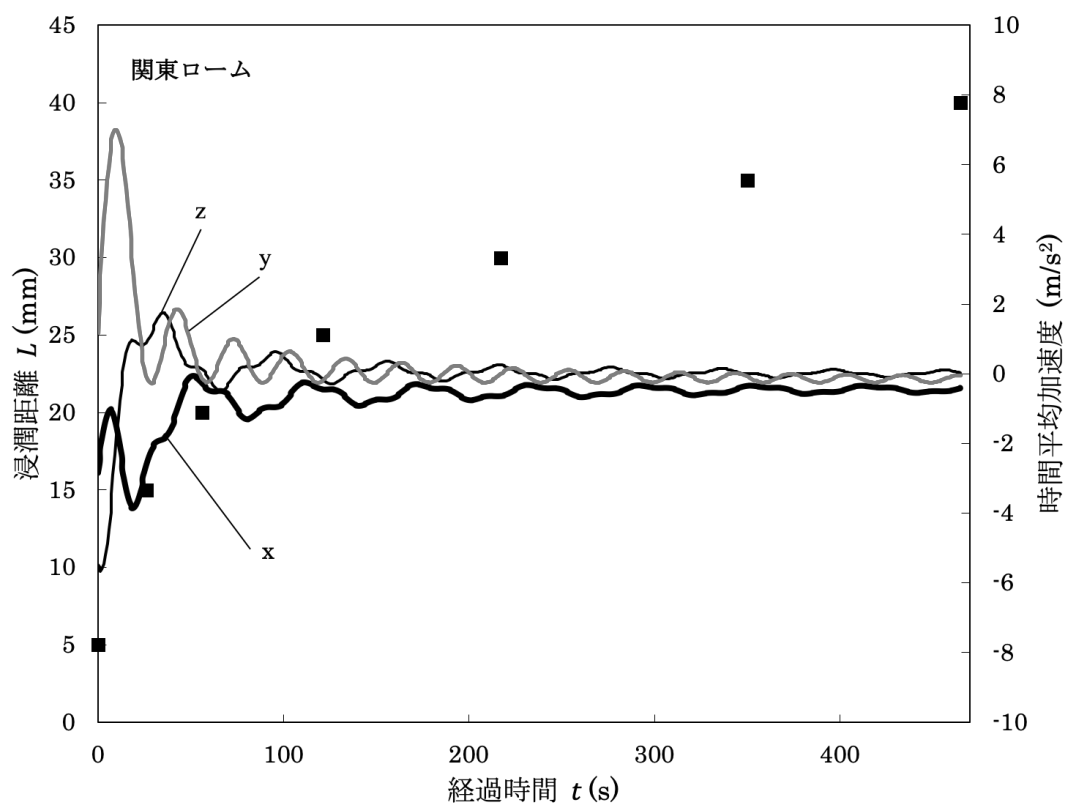


図 5.7 関東ロームを用いた浸潤実験における時間の経過に対する浸潤距離(黒点)と各軸の時間平均加速度.

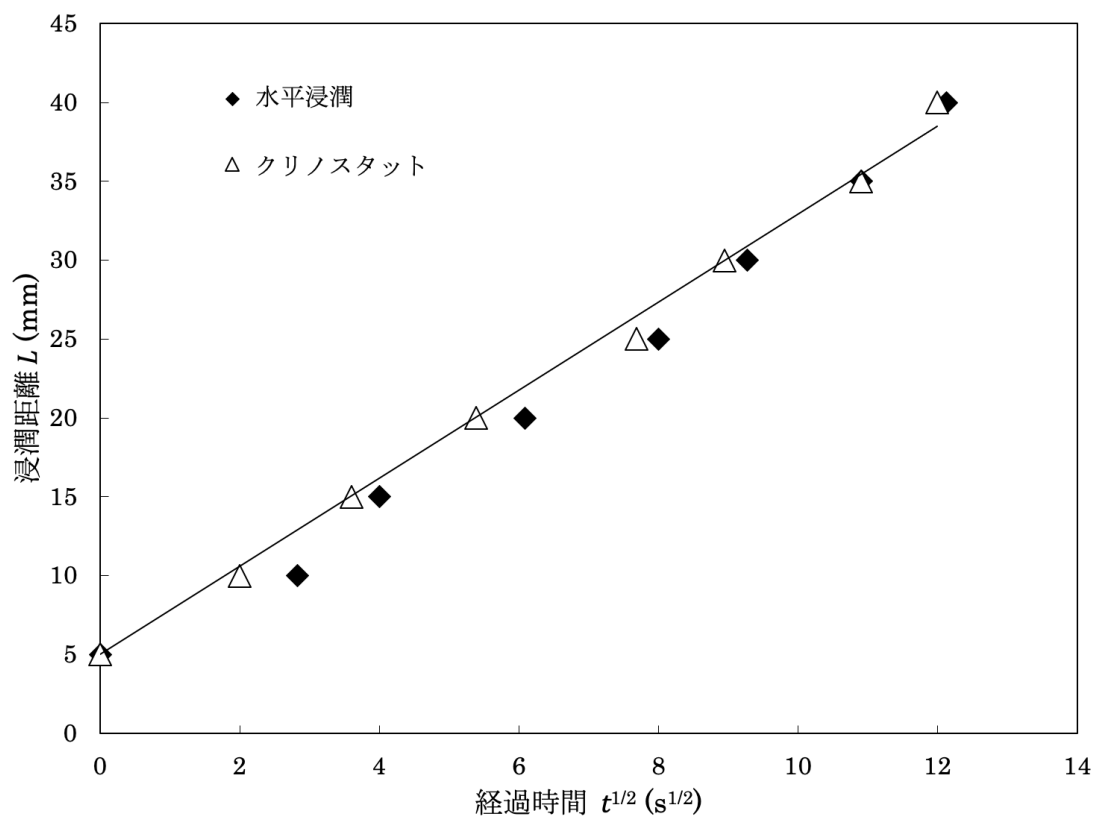


図 5.8 0.05 mm ガラスビーズを使ったクリノスタット実験と水平浸潤実験の比較.

表 5.1 実験に供試した多孔質体試料の充填密度と飽和透水係数.

	充填密度 (g/cm ³)	飽和透水係数 (cm/s)
豊浦砂	1.54	3.0×10^{-2}
ガラスビーズ	1.40	3.6×10^{-3}
関東ローム	0.80	2.3×10^{-3}

第6章 総括

本論文では、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主目的として、多孔質体中の巨視的および微視的な水分移動を観察した。第2章では、1G下と μG 下における多孔質体中の水分移動を比較することで、現在の水分移動理論の適用性について検討を行った。 μG 下において0.4 mmのガラスビーズを用いた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先行研究の低下量よりも小さかった。間隙径が小さい多孔質体中のゆっくりとした浸潤では μG 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、気相の捕捉がほとんど発生していないと考えられる浸潤初期においては現在の水分移動理論が適用可能であることを明らかにし、浸潤速度の低下量が時間の関数である可能性を示した。第3章では、単一間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。単一間隙中で水分移動が停止するかどうかは接触角と次の粒子までの距離で決定され、粒子配列の変化により浸潤を阻害する間隙が増加することが明らかになった。第4章では表面張力と粘性の変化が浸潤に与える影響を複合的に評価するため、それらの相対的な影響力の大きさを定量するパラメータ「S-N number」を提案し適用性を検討した。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と強い相関があり、重力の存在を前提としている従来のパラメータに比べて、 μG 下ではS-N numberを用いることが望ましいと考えられた。第5章では3Dクリノスタットを用いて水分浸潤実験を行い、 μG 下における浸潤の再現可能性について検討した。透水性が小さく、速度の遅い流れでは重力浸潤を相殺できたが、その浸潤速度は水平浸潤実験と一致し、 μG 下における浸潤速度の低下を模擬できなかった。

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、時間の経過とともに多孔質体の巨視的な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可能性があ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ていない。 μG 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

たりチャーズ式の見直しが必要である.

記号

Symbol	Description	Dimension
A	透水係数などから計算される係数	
a_i	$t=i$ における重力加速度の瞬時値	[L T ⁻²]
B_0	ポンドナンバー	
D	初期水位から粒子壁までの距離	[L]
D_{50}	代表粒径	[L]
e	間隙比	[L ³ L ⁻³]
g	重力加速度	[L T ⁻²]
$\bar{g}(t)$	時間平均加速度	[L T ⁻²]
$G_{average}$	平均重力レベル	
G_{max}	最大重力レベル	
G_{min}	最小重力レベル	
h	浸潤が停止する高さ	[L]
h_i	初期水位	[L]
H	界面移動が停止する距離	[L]
I	積算浸潤量	[L]
$I(t)$	時間 t における積算浸潤量	[L]
K	透水係数	[L T ⁻¹]
K_s	飽和透水係数	[L T ⁻¹]
K_i	ある浸潤溶液に対する透水係数	[L T ⁻¹]
K_w	水に対する透水係数	[L T ⁻¹]
k	透過率	[L ²]
k_i	ある浸潤溶液に対する透過率	[L ²]
k_w	水に対する透過率	[L ²]
L, l	浸潤距離	[L]
$L(t)$	時間 t における浸潤距離	[L]
L_{1G}	地球重力下における浸潤距離	[L]
$L_{\mu G}$	微小重力下における浸潤距離	[L]
n	間隙率	[L ³ L ⁻³]
p	静水圧	[M L ⁻¹ T ⁻²]
r	代表間隙半径	[L]
r_{GB}	多孔質体の代表間隙半径	[L]
r_{ws}	水源の半径	[L]
R	多孔質体の粒子半径	[L]
S_p	ソープティビティ	[L T ^{-0.5}]
t	時間	[T]
z	距離	[L]
α	遅延係数	

β	無次元定数	
γ	接触角	
Δp	毛管力	[M L ⁻¹ T ⁻²]
Δp_{GB}	多孔質体に働く毛管力	[M L ⁻¹ T ⁻²]
Δp_{ws}	水源に働く毛管力	[M L ⁻¹ T ⁻²]
ε	浸潤速度	[L T ^{-0.5}]
η	粘性	[M L ⁻¹ T ⁻¹]
η_i	ある浸潤溶液の粘性	[M L ⁻¹ T ⁻¹]
η_w	水の粘性	[M L ⁻¹ T ⁻¹]
θ	体積含水率	[L ³ L ⁻³]
ξ	毛管の壁の傾き	
ρ	密度	[M L ⁻³]
ρ_b	乾燥密度	[M L ⁻³]
ρ_s	粒子密度	[M L ⁻³]
ρ_i	ある浸潤溶液の密度	[M L ⁻³]
ρ_w	水の密度	[M L ⁻³]
σ	表面張力	[M T ⁻²]
ϕ	重力ポテンシャル	[L]
ψ	マトリックポテンシャル	[L]

謝辞

本研究を遂行し、論文をまとめるにあたり、多くの方にご指導、ご支援を頂きました。ここに記し御礼申し上げます。

登尾浩助 教授には、2012年に土地資源学研究室に入室してから現在に至るまで、終始、温かいご指導と激励を頂きました。私が学士課程のとき研究者という魅力的な道を示していただいたこと、微小重力という特異な環境で研究を行う貴重な機会を与えていただいたことを感謝しています。また、先生には知識だけでなく人として生きる姿勢や心構えなど多くのことを示して頂きました。先生からいただいたお言葉の一つ一つを胸に刻み、研究者として一層の努力をしていきたいと思えます。

水資源学研究室 小島信彦 准教授には、浸潤溶液の物理性と浸潤の関係について大変多くのご意見をいただきました。先生からいただいた多角的なアドバイスにより、研究をさらに進めることができました。

環境気象学研究室 矢崎友嗣 専任講師には、博士論文の副査を引き受けていただき、大変多くのご意見をいただきました。また、修了後の心構えについてもアドバイスと激励をいただきました。

地域環境計画研究室 服部俊宏 准教授は、私が学士課程のときから研究の進捗を気にかけてくださり、いつも温かい励ましの声をかけていただきました。

水分移動の重力依存性に関する研究の先駆者であられる、東京大学 国際情報農学研究室 溝口勝 教授には、研究内容について様々なアドバイスやアイデアをご教授いただきました。

研究室内外で先生方と議論させていただいたことで、自らの勉強不足を痛感し、さらに研究を進めることができました。そのような機会を与えていただいたことに感謝しています。

生田ものづくりセンターの技術指導員の皆様には、実験装置の設計や材料加工についてご教授いただきました。工学について浅学な私を丁寧にご指導いただいたことを感謝しています。

土地資源学研究室出身の先輩方には、大変多くのご指導と激励を頂きました。名倉理紗 先輩には、微小重力実験のノウハウや実験・解析の技術などをご指導いただきました。何度もご迷惑をおかけしたにも関わらず、終始、温かくご指導いただいたことを感謝しています。青木伸輔 先輩には、微小重力実験のたびに夜遅くまで準備をお手伝いいただきました。また、私の研究が停滞した際には様々なアイデアや技術をご教授いただきました。伊東雄樹先輩には、環境測定 of 技術に加え、国内や海外の学会やフィールドに連れて行っていただき、現場に根付いた研究の重要性を教えてくださいました。

丸尾裕一 君には、微小重力実験装置の作成を担当していただきました。微小重力実験が成功できたのは、制約が多い条件の中で繊細な装置を構築してくれた丸尾裕一君のおかげです。長沼菜摘 さん、野川健人 君には、微小重力実験を手伝って頂きました。ときには夜遅くまで作業が続くこともありましたが、二人のご支援のおかげで乗り切ることができました。研究室の皆さんがいなければ、この研究課題をやりきることは到底できなかつたと思います。たくさんのご支援をいただき本当にありがとうございました。

本研究の一部は、JSPS 科研費（課題番号：26660192）の助成を受けたものです。

本研究の一部は、JSPS 科研費（課題番号：17H06251）の助成を受けたものです。

本研究の一部は、明治大学若手研究費の助成を受けたものです。

本研究の一部は、北海道宇宙科学技術創成センター（HASTIC）ならびに株式会社植松電機の支援を受けて行ないました。

本研究の一部は、ダイヤモンドエアサービス株式会社の支援を受けて行ないました。

ここに記して謝意を表します。

最後に、私を大学院にまで進ませてくれた両親に感謝を伝えたいと思います。常に心身の健康を案じ、研究生活を応援してくれたことを感謝しています。ありがとうございました。

2019年3月 佐藤直人