

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

メタデータ	言語: jpn 出版者: 明治大学農学部 公開日: 2020-07-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 佐藤, 直人, 丸尾, 裕一, 登尾, 浩助 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/20949

〔研究ノート〕

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

佐藤 直人¹・丸尾 裕一¹・登尾 浩助²

(2018年4月27日受理)

Applicability of clinostat for simulating water infiltration in porous media under microgravity

Naoto SATO¹, Yuichi MARUO¹, and Kosuke NOBORIO²

Abstract

Horizontal infiltration experiments are usually performed to simulate moisture transfer under microgravity (μG) on the ground. However, when comparing the infiltration rates between horizontal infiltration experiments carried out on the ground and those carried out in the space station, the infiltration rates in the space station, i.e. under true μG , are reported as being lower than those on the ground. Horizontal infiltration experiments on the ground cannot truly simulate μG environments. To simulate moisture movement in porous media under μG on the ground, it is necessary to seek methods other than horizontal infiltration experiments. In this study, moisture imbibition experiments were performed using a 3D-clinostat, and infiltration rates were compared with those measured by horizontal infiltration experiments to investigate the performance of the 3D-clinostat as a true μG maker. For loamy soil and glass beads with small hydraulic conductivities, the influence of gravitational direction became negligible thus we confirmed that Washburn's equation was valid. The infiltration rate for the loamy soil using the 3D-clinostat was consistent with that of the horizontal water infiltration experiment, which means that the reduction of infiltration rates in the space station did not occur in the experiments using the 3D-clinostat. We concluded that the 3D-clinostat could not properly simulate the physical properties of water altered by μG although it successfully dissipated the effects of gravitational direction.

Key words: Porous Media, Water Movement, Microgravity, Clinostat, Horizontal Infiltration

要 旨 水平浸潤実験は重力勾配の存在しない条件下における水分移動を抽出し観察する実験であり、従来は微小重力下における多孔質体中の水分移動を模擬できると考えられていた。ところが、実際に宇宙ステーションで行われた実験の浸潤速度は、地上における水平浸潤速度と比較して小さいことが報告されている。したがって、水平浸潤実験は真の微小重力環境を模擬できておらず、地上で微小重力下における多孔質体中の水分移動を模擬するためには、水平浸潤実験に代わる実験方法を模索する必要がある。本研究では、微小重力下における多孔質体中の水分移動の模擬を目的として3Dクリノスタットの適用性の評価を行った。3Dクリノス

¹⁾ 明治大学大学院農学研究科

214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

Graduate school of Agriculture, Meiji University, Higashi-mita 1-1-1, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, Japan 214-8571

²⁾ 明治大学農学部

214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

School of Agriculture, Meiji University, Higashi-mita 1-1-1, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, Japan 214-8571

Email: noboriok@meiji.ac.jp

TEL: 044-934-7156; FAX: 044-934-7156

タットによる擬似微小重力下において豊浦砂、関東ローム、0.05 mm ガラスビーズへのそれぞれの水分浸潤実験を行い、同様の材料を使った水平浸潤実験の浸潤速度と比較した。豊浦砂に比べて透水係数の小さい関東ロームや0.05 mm ガラスビーズでは、重力浸透の影響が見えなくなり、Washburn 式の関係が確認された。しかし、3D クリノスタットによる浸潤速度は水平浸潤実験の結果と一致したが、微小重力下の宇宙ステーション実験で確認されたような浸潤速度の低下は確認できなかった。

キーワード：多孔質体，水分移動，微小重力，クリノスタット，水平浸潤

1. はじめに

1.1 微小重力実験の必要性

世界各国の宇宙開発機関は、2030年代の火星有人宇宙探査ミッションの実現に向けて協働することを確認している (ISECG 2013)。火星ミッションの期間は3年を想定しており、期間中の宇宙飛行士の食料をいかに調達するかが課題である。この食料問題の解決策として、宇宙空間において食料の自給自足を可能とする「宇宙農業」の実現が候補に挙げられる。現在までに実現している宇宙農業の一つとして国際宇宙ステーション (ISS) で行なわれている「VEGGIE」では、2015年に種からレタスを栽培し、宇宙飛行士が試食した (Massa ら 2017)。また、2016年には ISS 内で育てられた食用の百日草が開花した (Massa ら 2017)。このように宇宙空間における植物栽培は既に実現している。しかし、現在までに実現している植物栽培は、主に植物体への給水を噴霧や寒天培地によって行う養液栽培であり、生産できる作物は地上部を食用とする葉菜に限られる。一方で将来の宇宙農業作物として最も適しているのはイモ類と考えられており (Yamashita ら 2007)、その栽培には土耕栽培を行う必要がある。宇宙空間における土耕栽培を実現するためには、微小重力 (μG) 環境下における多孔質体中の水分移動の理解が不可欠である。

地上において μG 下の水分移動を模擬できる実験として行われているのが水平浸潤実験である。多孔質体中の水分浸潤移動を鉛直方向と水平方向とに分けて考えるとき、鉛直方向成分の駆動力は重力勾配とマトリックポテンシャル勾配であり、水平方向成分の駆動力はマトリックポテンシャル勾配のみとなり重力の影響は無視できると考えられている (Bruce と Klute

1956)。 μG 下における水分移動は重力勾配が存在しない条件下における水分移動であり、駆動力はマトリックポテンシャル勾配のみであると考えられる (Jones と Or 1998) ので、地上における水平浸潤実験は μG 下における水分移動が模擬できると考えられた (Yendler ら 1996)。ところが、地上で行った水平浸潤実験による浸潤速度と、実際に宇宙ステーションで行った浸潤実験による浸潤速度を比較したところ、宇宙ステーション、すなわち μG 下における浸潤速度は地上 (1 G) における水平浸潤速度よりも遅かったことが報告され (Jones と Or 1999)、地上における水平浸潤実験は真に μG 環境を模擬できてはいないことが判明した。従って、 μG 下における多孔質体中の水分移動を地上で模擬するためには、水平浸潤実験以外の方法を考える必要がある。

1.2 3D-クリノスタットによる微小重力実験の有用性

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 (小暮 2007)。しかし、これらの方法は μG 継続時間が2秒から8分程度 (小暮 2007) と短く、多孔質体中の水分挙動を観察するには、より長い時間の微小重力実験を行う必要がある (Or ら 2009)。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 (小暮 2007) 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 ら 1999; Brown ら 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ら 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ら 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ら 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(山下ら 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ら 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なった。

2. 材料と方法

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。クリノスタットでは、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次的に均等に分散する(Hoson 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ことが可能である。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 $\bar{g}(t)$ を式(1)により算出した。

$$\bar{g}(t) = \frac{\Delta t}{t} \sum_{i=0}^{t/\Delta t} a_i \quad (1)$$

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、

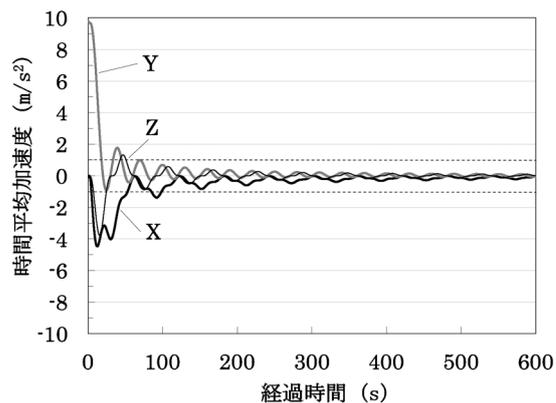


図1 各軸の時間平均加速度の変化：いずれの軸においても時間平均加速度は100秒程度で $\pm 0.1\text{G}$ (点線)の範囲に収束した。

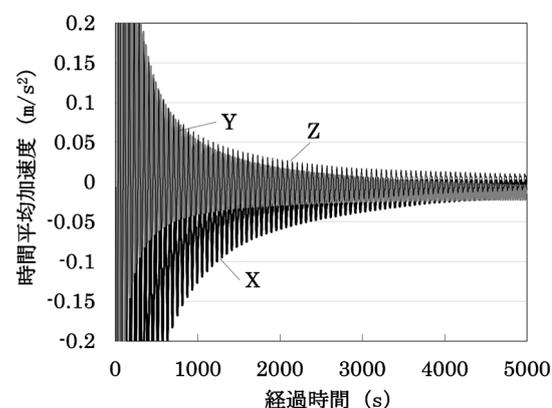


図2 各軸における時間平均加速度の変化(0 G付近の拡大図)：各軸の時間平均加速度は1300秒程度で $\pm 10^{-3}\text{G}$ の範囲に収束した。

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1に示す。また、0 G付近を拡大したものを図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1)、その後 10^{-3}G のオーダーに収束した(図2)。

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

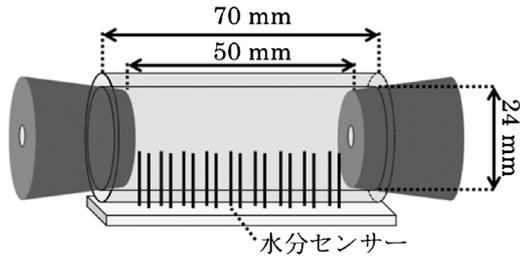


図3 実験カラム概要図

表1 実験に供試した多孔質体試料の乾燥密度と飽和透水係数

	乾燥密度 (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}

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) には抵抗式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ばし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 ら 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

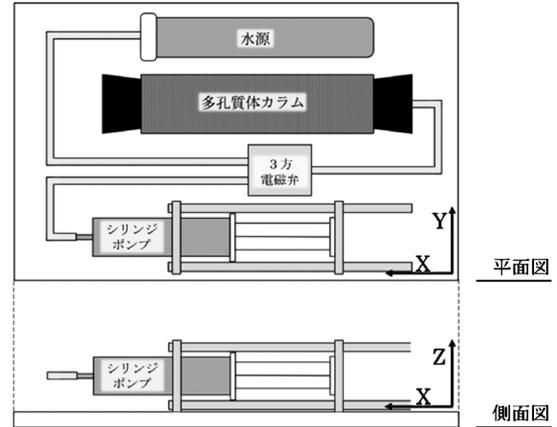


図4 実験装置概略図

を図4に示した。

2.3 実験手順

2.3.1 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 D 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 $4.5 \times 10^{-4} G$ 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。

2.3.2 水平浸潤実験

Jones と Or (1999) は μG 下における浸潤速度は1 G 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 1 G 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 D の関係を記録した。

3. 結 果

3.1 擬似微小重力実験

図 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 D 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 と 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 D と経過時間の平方根 $t^{1/2}$ の間には式(2)のような関係がある。

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

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 b, c）では、浸潤距離 D が経過時間の平方根 $t^{1/2}$ に対して正比例関係を示し、式(2)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（図 5 a）、式(2)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 6 は、豊浦砂を用いた浸潤実験における浸潤距離 D 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

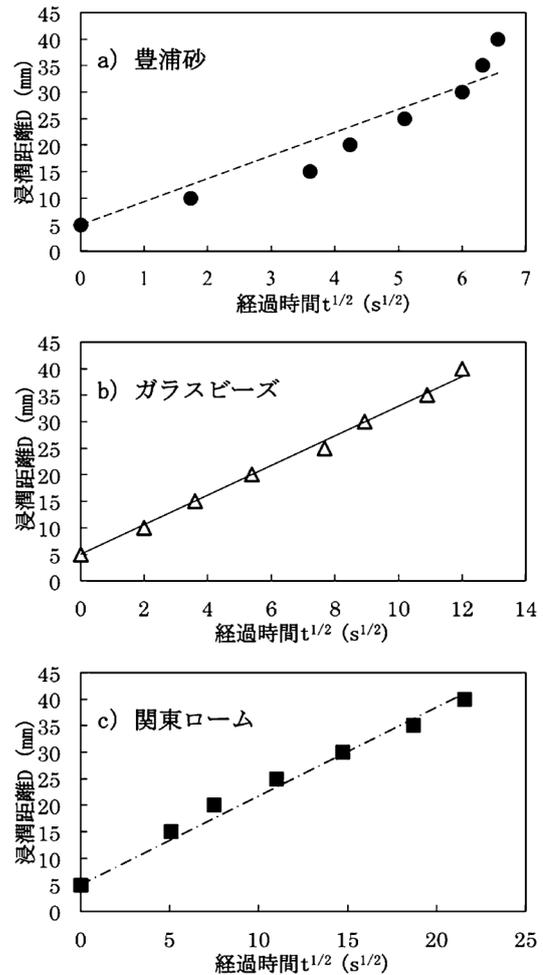


図 5 クリノスタットによる水分浸潤実験における浸潤距離と経過時間の平方根の関係

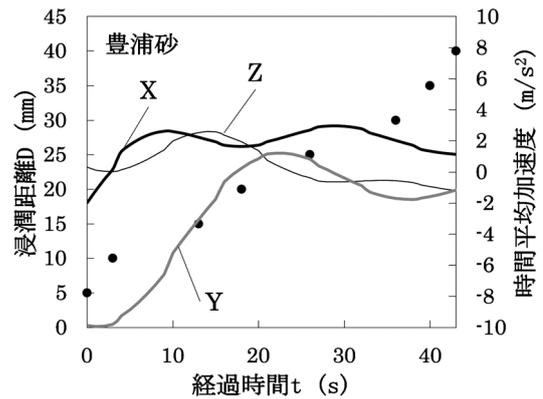


図 6 豊浦砂を用いた浸潤実験における時間の経過に対する浸潤距離（黒点）と各軸の時間平均加速度

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

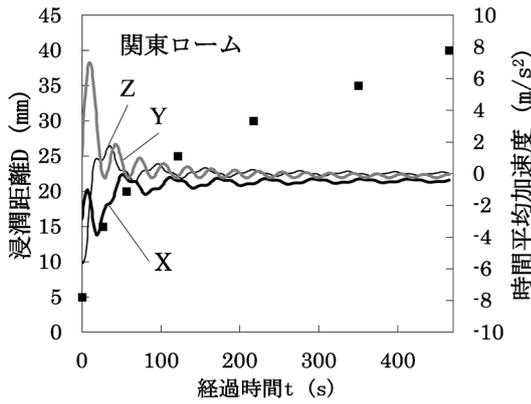


図7 関東ロームを用いた浸潤実験における時間の経過に対する浸潤距離（黒点）と各軸の時間平均加速度

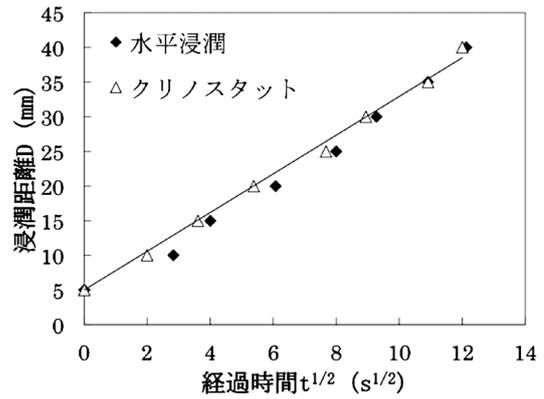


図8 0.05 mm ガラスビーズを使ったクリノスタット実験と水平浸潤実験の比較

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、この時、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 D および時間平均加速度と経過時間 t の関係を図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、式(2)の関係を確認できるようになった。従って、クリノスタットによって、透水性の小さい多孔質体を用いた場合には、重力勾配が無い環境下を模擬できたと考えられる。

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8に示す。水平浸潤実験においても浸潤距離 D 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、式(2)の関係を確認できた。図8で見るとように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 と Or (1999) が報告したような μG 条件における浸潤速度の低下を再現できないことが分かった。

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ら (2009) が報告した接触角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 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がある。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費26660192 (登尾浩助)の助成を受けたものであり、記して深謝します。

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.

Bruce RR and Klute A. (1956): The Measurement of Soil Moisture Diffusivity. *Soil Science Society of America Journal*, 20: 458–462.

Brutin D, Zhu Z, Rahli O, Xie J, Liu Q and Tadrist L. (2009): Sessile drop in microgravity: creation, contact angle and interface. *Microgravity Science and Technology*, 21: 67–76.

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.

International Space Exploration Coordination Group (ISECG). (2013): *The Global Exploration Roadmap* (2nd edition). NASA, Washington, DC, USA.

Jones SB and Or D. (1998): A capillary-driven root module for plant growth in microgravity. *Advances in Space Research*,

22: 1407–1412.

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.

Massa GD, Dufour NF, Carver JA, Hummerick ME, Wheeler RM, Morrow RC and Smith TM. (2017): VEG-01: Veggie hardware validation testing on the International space station. *Open Agriculture*, 2: 33–41.

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.

Or D, Tuller M and Jones SB. (2009): Liquid Behavior in Partially Saturated Porous Media under Variable Gravity. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 341–350.

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.

Yamashita M. and Space Agriculture Saloon. (2007): Development of the Space Agriculture Concept. *Space Utilization Research*, 23: 396–399.

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.

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.

小暮和美 (2007) : 微小重力実験施設と利用方法. *Journal of Plasma and Fusion Research*, 83: 161–163.