

微小重力下における土壌粒子モデル間隙中の水分移動

名倉 理紗¹・佐藤 直人¹・南 隼人¹・片野 健太郎¹・登尾 浩助¹

Water movement in experimentally-modeled soil void spaces under microgravity

Risa NAGURA¹, Naoto SATO¹, Hayato MINAMI¹, Kentaro KATANO¹,
and Kosuke NOBORIO¹

Abstract

Plant growth system for crop production under microgravity is part of a life supporting system designed for long-duration space missions. Plant growth in soil in space requires the understanding of water movement in soil void spaces under microgravity. Under 1G condition, on earth, water movement is expressed with the Darcy's law of soil physics. Under microgravity condition, however, water movement is still not well understood. Watanabe et al. (2011) conducted parabolic flight experiments to observe water movement in porous media. They reported that although water moved upward along the side of a column that was filled with porous media under microgravity, water was hardly moved in the void space of glass beads. Their results showed that more experiments on water movement in porous media are needed to observe water movement in a void space with a smaller scale under microgravity. The objectives of this study are to visualize water movement in experimentally-modeled soil void spaces under microgravity.

Keyword(s): soil void spaces, water movement

1. はじめに

宇宙での長期的な有人活動は 1970 年代から行われており、今後も月や火星でのより長期的な有人宇宙活動の実現が見据えられている。より長期的な有人宇宙活動を実現するためには様々な生命維持システムが必要である。その一つとして、持続的な食料の供給を可能にするために宇宙で作物を栽培するシステムの開発が検討されている¹⁾。宇宙で土耕栽培を行うにあたって、微小重力下における土壌粒子間隙中の水分移動のメカニズムを明らかにすることが、宇宙空間での植物の生育環境を調節する上で非常に重要である。重力が 1G である地球上では、土壌中の水分移動はダルシーの法則によって表すことができる。一方微小重力環境下では、リチャーズ式で土壌中の水分移動を表すことができると報告されている^{2,3)}が、土壌粒子間隙中の水分移動の詳細なメカニズムはまだ明らかでない。渡邊ら⁴⁾は、ガラスビーズを土壌粒子と仮定した模擬土壌を作成し、微小重力下における模擬土壌間隙中の水分移動を可視化する実験を行った。微小重力下において模擬土壌中の水分上昇が認められたが、模擬土壌の間隙内の水分上昇よりもカラム壁面を伝った水分上昇の方が大きく、間隙内の水分移動を詳細に捉えるこ

とが出来なかった。彼らは、水分がカラム壁面を伝った原因は、カラム壁面がガラスビーズ表面の濡れ性に比べて高かったためであると報告した。微小重力下における模擬土壌粒子間隙中の水分移動を捉えるには、模擬土壌粒子がカラム壁面に接しないような実験装置を作成し、より小さいスケールで模擬土壌粒子間隙中の水分の挙動を解析する必要がある。本研究では、濡れ性の水分移動への影響を無くし、微小重力下における模擬土壌粒子間隙中の水分移動を可視化し画像解析することで、水分の挙動を捉えることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試料

2.1.1 航空機による微小重力実験

模擬土壌粒子として、直径 32.7mm、高さ 80mm のガラス製透明丸底フラスコの底部を使用した (Fig 1)。事前処理として、中性洗剤で丸底フラスコを洗浄し脱脂綿でこすり水道水をかけ流した後、蒸留水で濯いだ。洗浄後

1 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, 1-1-1, Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-city, Kanagawa, Japan



Fig. 1 A picture of round-bottomed glass flask

よく水を振り切ってデシケーターに入れ乾かした⁵⁾。水分移動を見やすくするために、アナトー色素を蒸留水で500倍に希釈した水溶液を使用した。

2.1.2 アナトー色素水溶液の状態評価

渡邊ら⁴⁾の実験と本研究の結果を比較するために、渡邊らが用いた蛍光水溶液と本研究で用いたアナトー色素水溶液の液体の状態の違いを、濡れ性、表面張力および粘度により評価した。それぞれの測定にはアナトー色素水溶液、蛍光水溶液および蒸留水を液体試料として使用し、アナトー色素水溶液の状態を相対的に評価した。

2.2 実験装置

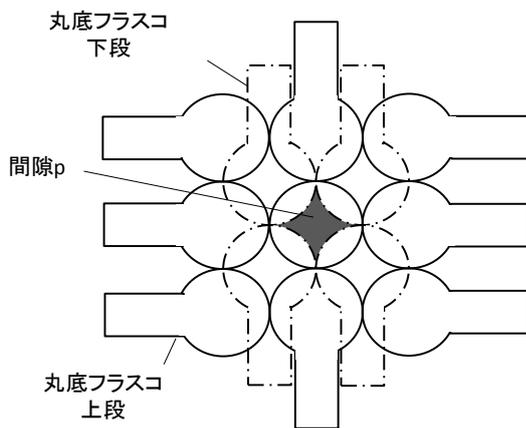


Fig. 2 Plane view of experimentally-modeled soil particle array

丸底フラスコを組み合わせることによって2段構成の土壤粒子配列 (Fig. 2) を模擬的に再現し、アクリル製透明カラム (後藤製作所/オーダーメイド) 内に土壤粒子配列を固定し土壤粒子モデルを作成した (Fig. 3)。水分が

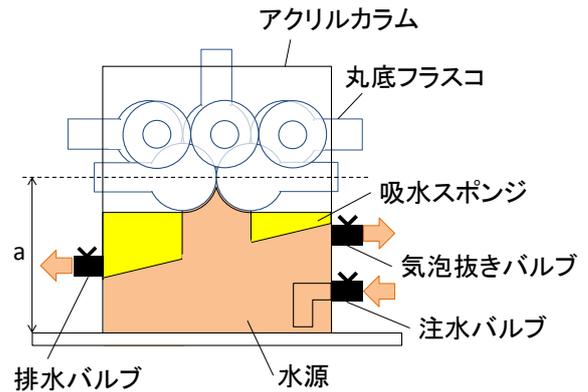


Fig. 3 Experimentally-modeled soil

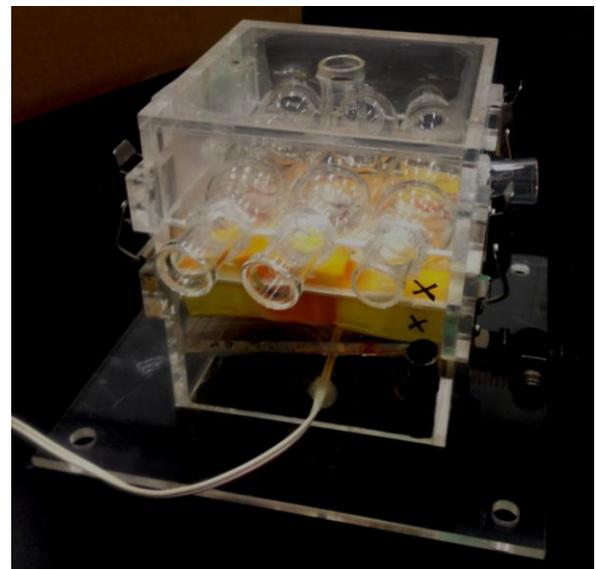


Fig. 4 A picture of experimentally-modeled soil

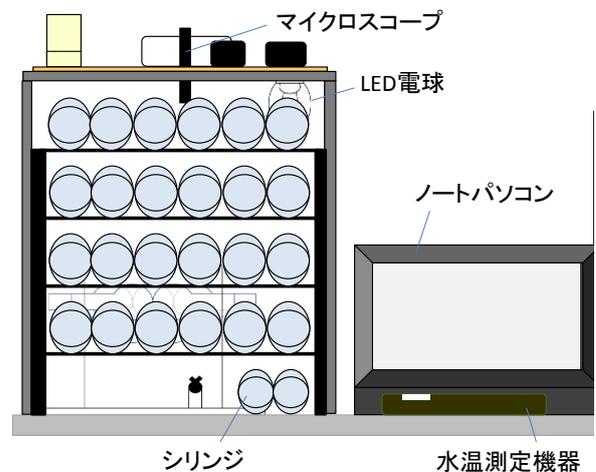


Fig. 5 Front view of experimental setup

カラム壁面を伝うことがないように、下段模擬土壌粒子の間隙 p からのみ水分が移動するようにした (Fig. 2)。移動した水分は微小重力状態終了後に吸水スポンジで吸水し、吸水した水分は排水バルブからシリンジで吸引し回収した。アナトー色素水溶液を土壌粒子モデルの水源内に充填する際、水源内に気泡がたまってしまいうため、気泡抜きバルブからシリンジで気泡を抜いた。水源の水面高さは、常に放物線飛行開始前に、1 段目模擬土壌粒子同士の接触点の高さ a に設定した (Fig. 3)。水溶液の水温が変化すると粘度が変化し水分移動に影響することが考えられるため、水源内に設置した熱電対を水温測定機器に接続し、水溶液の水温を測定した。実験装置は Fig. 5～7 のように配置した。動画撮影の際にアクリルカラム表面に光反射が生じるため、Fig. 6, 7 の赤枠で示した範囲に暗幕を被覆した (Fig. 8)。暗幕内の撮影用光源には、全光束値が 40 lm の LED 電球を使用した。微小重力状態中に、土壌粒子モデルを真上および真横から動画撮影することにより水分移動を捉えた。真上からは、取り付けしやすいマイクロSCOPE (Hong Kong Capital International Electronics Company/B002 7mm Portable USB Microscope) で撮影し、真横からはビデオカメラ (SONY/HDR-CX700V) で撮影した。マイクロSCOPE はノートパソコンに USB 接続し、撮影した動画をハードディスク内に保存した。

2.3 実験方法

2.3.1 液体試料の状態評価

濡れ性は液体を固体表面に滴下した時の液体の接触角で表され、接触角が小さいほど濡れ性は低い。本研究では液滴形状法⁵⁾により接触角を測定した。液滴形状法とは、液体試料を固体試料表面に滴下し、液滴の直径から間接的に接触角を求める方法である。丸底プラスチック球部にアナトー色素水溶液、蛍光水溶液、蒸留水を真上から 7 μ L 滴下し、滴下後 5 分経過したときの液滴の直径を測定し接触角を求めた。

液体試料の表面張力は、静滴法⁵⁾により評価した。静滴法とは、液滴の頂部が平面と見なされるまでパラフィン板上に液体試料を滴下し、液滴高さを測定することにより表面張力を求める方法である。パラフィン上にアナトー色素水溶液、蛍光水溶液、蒸留水を滴下し、液滴の頂部が平面となったときの液滴を測定し、表面張力を求めた。

液体試料の粘度はオストワルド粘度計を用いて測定した。アナトー色素水溶液は 19.8 $^{\circ}$ C、蛍光水溶液は 19.3 $^{\circ}$ C、蛍光水溶液は 20.3 $^{\circ}$ C に水温を一定に保った水槽内にオストワルド粘度計を固定し測定を行い、蒸留水に対するアナトー色素水溶液および蛍光水溶液の相対粘度を求めた。

2.3.2 航空機による微小重力実験

本実験は、約 20 秒間の微小重力状態を作り出すことが

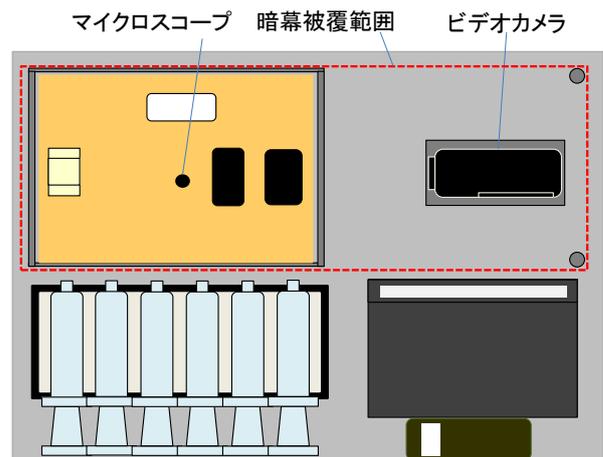


Fig. 6 Top view of experimental setup

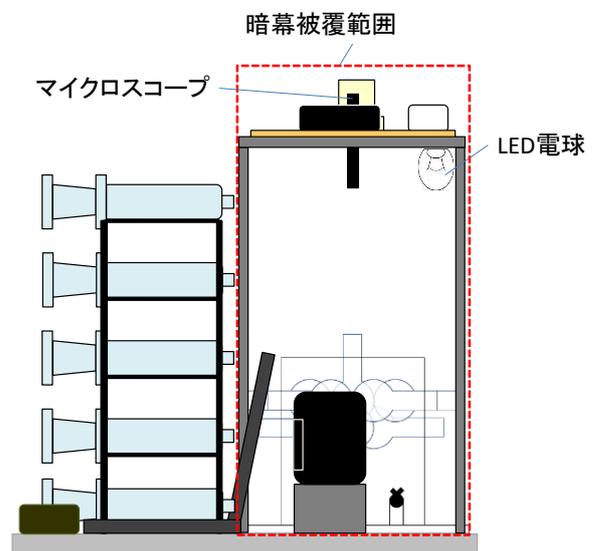


Fig. 7 Side view of experimental setup



Fig. 8 A picture of experimental setup covered with blackout

Table 1 Condition of water injection during parabolic flight

放物線飛行	注水条件	注水時間 (sec)	注水量 (ml)	注水速度 (ml/sec)
1	①	—	0	—
2		—	0	—
3	②	21	20	0.95
4		21	42	2.00
5		21	42	2.00
6		21	35	1.67
7	③	10	10	1.00
8		10	22	2.20
9		10	20	2.00
10		10	15	1.50
11		10	20	2.00

できる放物線飛行を使用して行った。放物線飛行は全 11 回行われた。微小重力状態中に水位を Fig. 3 に示した高さ a より上に押し上げなければ水分移動が全く見られなかったため、シリンジを用いて以下の 3 つの条件で水源への注水を行った。約 20 秒間の微小重力状態中に①注水しない場合、②常に注水し水位を上昇させる場合、③最初の 10 秒間のみ注水し水位を上昇させる場合である。放物線飛行中に土壌粒子モデルを撮影し、注水条件を変化させたときの水分移動変化の様子を捉え、動画取得した。放物線飛行ごとの注水条件、注水量及び注水速度を Table 1 に示す。

2.4 解析方法

取得した動画から静止画を抽出し、各注水条件下での水分移動の様子を比較した。さらに真上から撮影した動画から、画像解析アプリケーション (imageJ) を用いて、上段模擬土壌粒子同士の接触点の水分分布面積を求め、各放物線飛行中の水分分布面積変化を解析した。

3. 結果と考察

3.1 アナトー色素水溶液の状態評価

各液体試料の濡れ性、表面張力、粘度の平均値を Table 2 に示した。すべての測定項目において、アナトー色素は蛍光水溶液よりも蒸留水に近い値となった。よってアナトー色素水溶液はより水に近い状態の液体であるため、蛍光水溶液よりも水分移動しやすい可能性がある。しかし、濡れ性は蛍光水溶液の方がアナトー色素水溶液よりも高く、粘度はアナトー色素水溶液の方が低かったことから、必ずしもアナトー色素水溶液の方が蛍光水溶液よりも模擬土壌粒子間隙中を水分移動しやすいとは言えない。

3.2 各注水条件の静止画の比較

各注水条件における水分移動の様子を Fig.9 に静止画で示した。静止画は微小重力状態中に真上から撮影したものである。注水しなかった場合は、水分が模擬土壌粒子間隙中を上昇せず水分移動は観察されなかった (Fig. 9 (a))。常に注水した場合は、水位が押し上げられたことによって水分上昇が観察されたが、最大上昇高さは上段模擬土壌粒子同士の接触点の高さであった (Fig. 9 (b))。最大水分上昇高さが上段模擬土壌粒子同士の接触点の高さであった原因は、本研究で使用した模擬土壌粒子の粒径が 32.7mm と非常に大きいことにより吸引圧が働かないためであると考えられる。最初の 10 秒間のみ注水した場合は、注水中は注水した場合と同様の水分上昇が観察された。注水終了後から放物線飛行終了時までの 10 秒間は、上段模擬土壌粒子同士の接触点において液架橋のような形状 (Fig. 10) で水分が保持されていることが確認できた (Fig. 9 (c))。水分の液架橋のような形状は、水面のメニスカスの毛管力によって生じたものと考えられる。水面のメニスカスとは土壌粒子表面の水の付着力と水分子相互の凝集力の 2 つが同時に働くことによって生じる⁶⁾。重力が 1G であるときの水面のメニスカスを Fig.

Table 2. Evaluation of liquid state

液体試料	濡れ性 (°)	濡れ性測定数	標準偏差
アナトー色素水溶液	22.75	14	0.242
蛍光水溶液	17.62	19	0.284
蒸留水	47.08	9	0.086
液体試料	表面張力 (N/m)	表面張力測定数	
アナトー色素水溶液	0.062	4	
蛍光水溶液	0.037	3	
蒸留水	0.075	4	
液体試料	粘度 (Pa·s)	粘度測定数	
アナトー色素水溶液	0.0010	4	
蛍光水溶液	0.0014	3	
蒸留水	0.0010	4	

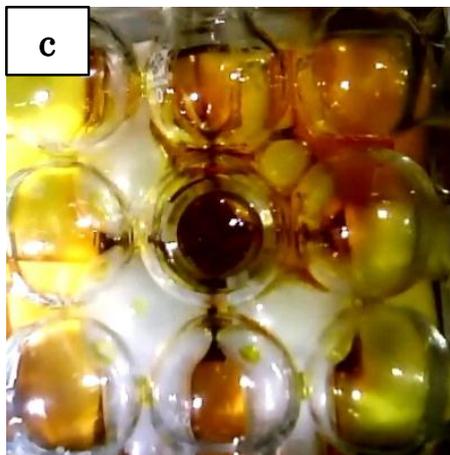
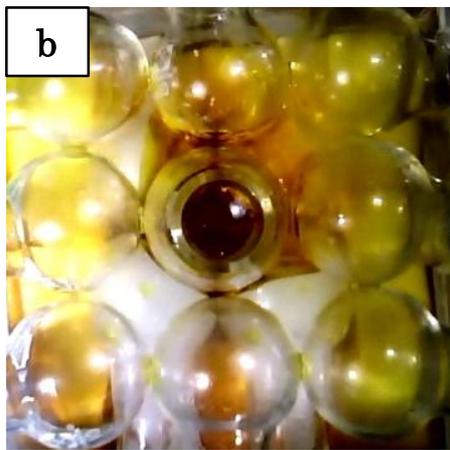
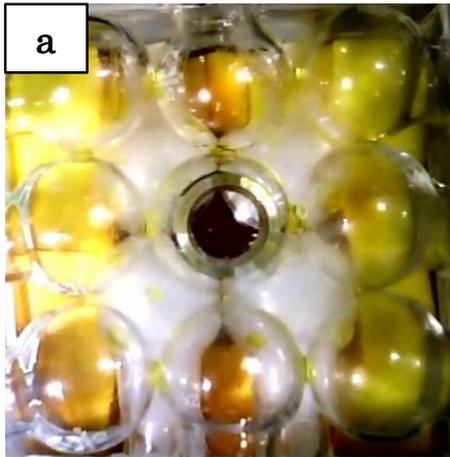


Fig. 9 A picture on condition that (a) no water injected, (b) water injected from beginning to end, (c) water injected for 10 seconds from beginning during microgravity

10 に示す。注水終了後から放物線飛行終了時までの微小重力下 (Fig. 9 (c)) と 1G 下 (Fig. 11) で模擬土壌粒子接触点に保持された水分量を比較すると、微小重力下の方が水分が多く保持されたことが認められた。よって、微小重力下では 1G 下よりも水面のメニスカスの毛管力が

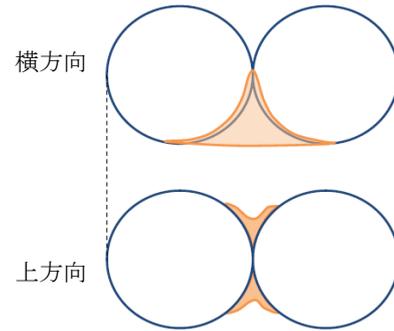


Fig. 10 A schematic drawing aqueous solution distribution sharpened like liquid bridge



Fig. 11 A picture under 1G

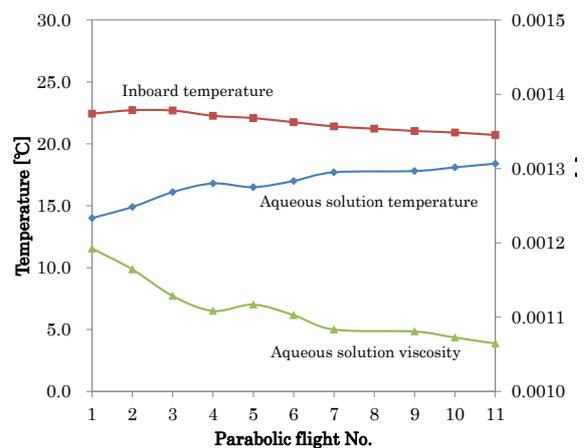


Fig. 12 Alteration of aqueous solution temperature, inboard temperature and aqueous solution viscosity during parabolic flight

大きくなり, 土壌粒子接触点に水分が保持されることが考えられる。

3.3 温度変化および粘度変化

微小重力実験開始時の航空機内温度がアナトー色素水溶液の水温よりも高かったため, アナトー色素水溶液の水温は放物線飛行の回数を重ねるにつれ緩やかに上昇し, 航空機内温度に近づいた。粘度は放物線飛行 1 回目から 4 回目にかけて著しく低下したが, その後は緩やかに低下したため, 水分移動への影響は小さいと考えられる (Fig. 12)。

3.4 重力変化と水分分布面積変化の関係

各注水条件における上段の模擬土壌粒子間隙中の水分分布面積変化および重力変化を Fig. 13 に示した。横軸は微小重力状態開始時間を 0 秒とした。微小重力状態中に注水した場合 (Fig. 13 (a, b)) は, 注水開始後に上段の模擬土壌粒子に水分が分布するようになると, 水分分布面積はある一定の面積で安定した。最初の 10 秒間のみ注水した場合 (Fig. 13 (c, d)) は, 注水中は下方から水

分を押し上げていたため水分分布面積は安定したが, 注水終了後は増減を繰り返しながら緩やかに減少した。さらに, 注水終了後から放物線飛行終了時までの水分分布面積は, 重力変化の増加に伴い減少することが確認できた。よって模擬土壌粒子間隙中の水分分布の変化は, 重力変化と相関があることが考えられる。

4. おわりに

本研究では, 濡れ性によるカラム壁面の水分移動を抑え, 微小重力下における模擬土壌粒子間隙中の水分移動を可視化し画像解析することにより, 水分の挙動を捉えた。その結果, 注水条件を変化させることにより水分移動の様子が異なることが認められた。また模擬土壌粒子同士の接触点において, 水面のメニスカスの毛管力で水分が保持されていることが認められた。模擬土壌粒子同士の接触点の水分保持量は 1G 下よりも微小重力下の方が多かったため, 微小重力下では水面のメニスカスによる毛管力が大きくなり, 水分が保持されることが考えられる。水面のメニスカスの毛管力と微小重力の関係性につ

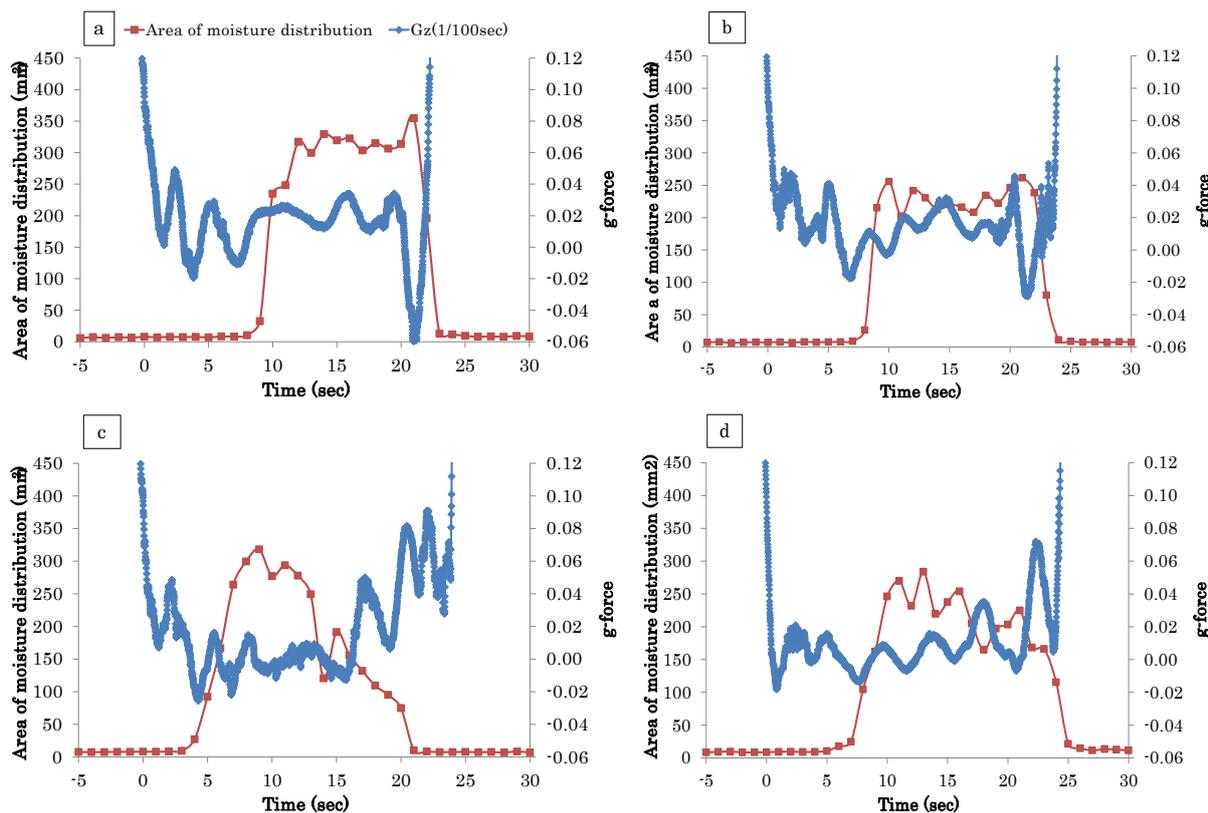


Fig. 13 Measured area of moisture distribution and gravitational acceleration during microgravity on condition that (a, b) water injected from beginning to end of microgravity and (c, d) water injected for 10 seconds from beginning during microgravity. Water injection rate is 2.0ml/sec in (a), 1.6ml/sec in (b), 1.0ml/sec in (c), and 2.0ml/sec in (d).

いては、今後解析を進め検討する必要がある。

謝辞

この実験を行うにあたり、多くの助言と支援をくださった JAXA（独立行政法人宇宙航空研究開発機構）の皆様、ダイヤモンドエアサービス株式会社の皆様、JSF（財団法人日本宇宙フォーラム）の皆様には厚く御礼申し上げます。また実験準備等に協力して下さった明治大学土地資源学研究室の皆様、実験装置制作に尽力して下さった有限会社ヒロセ理化学の廣瀬治郎氏および株式会社後藤製作所の皆様、そして本実験に関わって下さった全ての方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 宮嶋宏行, 柚原直弘: 日本航空宇宙論文集, Vol. 54, No. 631 (2006) 327.
- 2) S. L. Steinberg, S. B. Jones, M. Xiao, L. Reddi, G. Kluitenberg, D. Or, J. Iwan, D. Alexander, N. Daidzic and M. Tuller: SAE Technical Paper 2005-01-2947. SAE Int., Warrendale, PA.
- 3) R. Heinse, S. B. Jones, S. L. Steinberg, M. Tuller and D. Or: Vadose Zone J., 6 (2006) 713.
- 4) 渡邊幸, 小宮秀治朗, 名倉理紗, 鈴木心也, 登尾浩助: 平成 23 年度学生無重力実験コンテストにおける「微小重力下での多孔質体中の水分移動」実験結果 (未発表)
- 5) 関根幸四郎: 表面張力測定法, 2 章, p. 16, 理工図書, 1957
- 6) 八幡敏雄: 土壌の物理, 第 4 章, p. 35-37, 理工図書, 1975

付録

付録 1 濡れ性測定結果

アナトー色素水溶液		蛍光水溶液		蒸留水	
測定数	液滴直径 (mm)	測定数	液滴直径 (mm)	測定数	液滴直径 (mm)
1	5.22	1	6.09	1	4.28
2	5.54	2	6.26	2	4.14
3	5.22	3	6.03	3	4.15
4	5.54	4	6.01	4	4.25
5	5.87	5	5.84	5	4.45
6	5.27	6	6.53	6	4.29
7	5.44	7	5.63	7	4.28
8	5.87	8	5.89	8	4.21
9	5.8	9	5.79	9	4.24
10	5.91	10	5.91		
11	5.85	11	6.04		
12	5.42	12	5.68		
13	5.72	13	6.5		
14	5.63	14	6.48		
		15	6.52		
		16	6.41		
		17	6.34		
		18	5.95		
		19	6.22		

付録 2 液滴形状法による接触角の計算式

固体表面上に静止した液滴の高さを h , 液滴平均半径を r , 液滴の容積を V , 接触角を θ とすると,

$$V = \pi \left(\frac{r^2 h}{2} + \frac{h^3}{6} \right)$$

となるので、これを書き換えると

$$\frac{V}{r^3} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{h}{r} \right) + \frac{\pi}{6} \left(\frac{h}{r} \right)^3$$

となり、液滴の容積 V および液滴平均半径 r から h/r が求められる。 h/r と接触角 θ の関係式は

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{h}{r}$$

で表される。よって液滴の容積 V および液滴平均半径 r から接触角 θ が求まる。

付録 3 静滴法による表面張力の計算式

液体試料の密度を ρ , 接触角を θ , 液滴高さを H とすると、液体試料の表面張力 γ は次式で表される。

$$\gamma = \frac{\rho g H^2}{2(1 - \cos \theta)}$$

付録 4 液体試料の密度測定

静的法により表面張力を算出するために必要な液体試料の密度をピクノメーターを用いて測定した。ピクノメーターに液体試料を充填したときの重量を 5 回測定し、平均値を求め M_1 とした。重量測定時に液体試料の水温 t ($^{\circ}\text{C}$) も測定した。空のピクノメーターの重さを M_0 とすると、 $M_1 - M_0$ がピクノメーターに充填した液体試料の $t^{\circ}\text{C}$ における重さであり、これを W_t とした。 $t^{\circ}\text{C}$ でのピクノメーターの容積を V , 液体試料の密度を ρ_t , 空気の密度を σ_t とすると,

$$V_t = \frac{W_t}{\rho_t - \sigma_t}$$

と表される。さらに、 $t^{\circ}\text{C}$ での液体試料の密度を K_t とすると,

$$K_t = \frac{W_t}{V_t} + \sigma_t$$

と表される。